

基于多源数据融合的地铁隧道断面收敛精准测量研究

绳鹏程

(中铁十八局集团第五工程有限公司, 天津 300459)

摘要: 为精准完成地铁隧道断面收敛变形测量, 提出基于多源数据融合的地铁隧道断面收敛精准测量方法。该方法利用激光扫描仪和全站仪, 采集隧道断面的点云数据和高程数据, 通过联邦学习算法融合采集的隧道多源数据后, 利用隧道结构中心线方法批量切片处理融合后的数据, 快速提取地铁隧道断面, 在此基础上, 对其进行转换后构建隧道断面独立平面坐标, 并拟合隧道半径结果和设计结果之间的差值, 获取断面收敛变形量。测试结果显示: 该方法具有较好的隧道数据采集能力, 依据采集结果有效完成隧道断面椭圆度计算, 完成隧道断面拟合, 计算隧道不同角度下的变形量, 角度在 100° 和 340° 时, 断面收敛变形量最大, 最大值达30.1 mm。

关键词: 多源数据融合; 地铁隧道; 断面收敛; 精准测量; 切片处理; 隧道拟合

中图分类号: U 231.3; U 452.1

文献标识码: A

Research on Accurate Measurement of Convergence of Subway Tunnel Sections Based on Multi-source Data Fusion

SHENG Pengcheng

(The Fifth Engineering Co., Ltd. of China Railway 18th Bureau Group, Tianjin 300459, China)

Abstract: In order to accurately measure the convergence deformation of subway tunnel sections, a precise measurement method for subway tunnel section convergence based on multi-source data fusion is proposed. This method uses a laser scanner and a total station to collect the point cloud data and elevation data of the tunnel section. After the collected tunnel multi-source data is fused through the Federated Learning Algorithm, the fused data is processed by batch slicing using the tunnel structure centerline method, and the subway tunnel section is quickly extracted. On this basis, the independent plane coordinates of the tunnel section are constructed after conversion, and the difference between the tunnel radius result and the design result is fitted to obtain the convergence deformation of the cross-section. The test results show that this method has good tunnel data collection ability, and effectively completes the calculation of tunnel section ellipticity based on the collection results, the fitting of the tunnel cross-section, and calculates the deformation at different angles of the tunnel. When the angles are around 90° and 350° , the convergence deformation of the cross-section is the largest, with the maximum value reaching 30.1 mm.

Key words: multi-source data fusion; subway tunnels; cross-section convergence; accurate measurement; slicing treatment; tunnel fitting

1 引言

地铁隧道在建设过程中, 跨度较长, 地质环境复杂^[1], 需对隧道结构的安全状态进行全面监

测和掌控, 实现地铁隧道断面的自动化检测^[2], 掌握断面分布情况, 并对其收敛变形情况进行测量。隧道收敛变形是隧道施工时受到不均匀外力作用后形成的变形^[3], 会导致隧道空间形态轮廓

收稿日期: 2023-09-01

作者简介: 绳鹏程, 工程师, 本科, 研究方向为地铁测量及监测

发生变化, 和设计结果之间发生显著偏差; 收敛变形对隧道的危害极大, 会导致隧道形成裂缝、渗水以及脱落等病害^[4], 对于隧道结构以及正常使用造成较大安全隐患。地铁隧道断面收敛精准测量是对隧道空间位置的尺寸进行测量^[5], 通过位置尺寸的变化描述隧道断面收敛变形情况。但是传统仪器测量精度存在一定误差^[6]。因此国内外学者针对地铁隧道断面收敛精准测量展开了研究。李翔宇^[7]等为精准掌握地铁隧道的变形情况, 以现场实际测量的沉降数据为基础, 利用改进的神经网络模型对隧道沉降情况进行预测, 该方法能够对于隧道未来的沉降情况进行预测, 但是无法获取断面收敛变形的精准结果。李照众^[8]等为掌握隧道围岩的收敛变形情况, 采用组合模型对其进行预测, 获取围岩收敛变形预测结果, 但是该方法在应用过程中无法精准提取断面情况。国外学者采用点云柱面投影布料模拟滤波, 对隧道衬砌和辅助墩的点云进行分离, 然后采用椭圆模型拟合断面曲线, 通过分析椭圆参数来判断隧道的变形情况, 但对于复杂隧道结构, 柱面投影可能无法准确地重建出衬砌表面, 导致结果判断不准确。

为解决上述问题, 本文提出基于多源数据融合的地铁隧道断面收敛精准测量方法。多源数据融合方法是海量异构数据的处理方法, 能够完成不同格式、不同数据源数据的集中性处理^[9], 获取有效数据, 具有多项优势: 通过综合不同类型的测量仪器和传感器的数据, 消除各种误差, 大幅提高了测量精度和可靠性; 能够整合不同位置和方向的测量数据, 拓展了测量覆盖范围, 为地铁隧道收敛情况提供更全面的评估依据; 结合实时监测数据与历史数据, 能够及时发现收敛异常情况并采取相应措施处理, 提升了地铁隧道的安全性和稳定性; 自动化处理和分析能力的应用降低了人为干预的需求, 从而节省了时间和人力资源。

2 地铁隧道断面收敛精准测量

2.1 地铁隧道断面数据采集

为实现地铁隧道断面收敛精准测量, 需先获取隧道断面数据, 本文主要采用激光扫描仪和全站仪获取地铁隧道断面数据。

2.1.1 基于激光扫描的隧道断面采样

将激光测距仪投射在隧道中。激光扫描仪获取地铁隧道断面激光扫描图像边缘轮廓阈值 $h_{\beta}(X)$ 的计算公式为:

$$h_{\beta}(X) = T(R_{\beta}) + T(R_{\beta})X \quad (1)$$

式中: $T(R_{\beta})$ 表示图像的灰度值; X 表示图像中全部像素点的标准方差。

利用激光视觉跟踪识别方法获取地铁隧道断面激光扫描图像的边缘像素分布像素值:

$$w(d_{ij}) = \frac{1}{r^2} \sum_{i=1}^j f(|x_i - x_j|) \quad (2)$$

式中: d_{ij} 表示表示第 i 个像素与第 j 个像素之间的距离; r 表示激光扫描距离; $f(|x_i - x_j|)$ 表示分割正确率, x 表示像素点的横坐标。

结合梯度像素分解和模糊度辨识方法, 分析断面层纹理情况, 以此构建地铁隧道断面激光扫描图像的视觉增强模型:

$$T(x, y) = w(d_{ij}) \left[1 + k \left(\frac{h_{\beta}(X)}{r^2} - 1 \right) \right] \quad (3)$$

式中: k 表示修正系数。

利用频域滤波分析获取断面层拓扑结构分布矩阵 K_{ab} :

$$K_{ab} = \begin{bmatrix} Q_x & Q_y \\ Q_{y-1} & Q_{x-1} \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中: Q_x 和 Q_y 均表示拓扑分布向量, 前者对应 x 轴坐标方向, 后者对应 y 轴坐标方向。

依据隧道断面激光扫描的输出结果, 构建隧道断面激光扫描图像采集模型, 该采集利用空间复杂曲面重构方法完成, 其计算公式为:

$$T_{can}(z) = \frac{|K_{ab} - T(x, y)|}{\sum_{i=1}^j M_{ij}} \quad (5)$$

式中: M 表示输入的多源异构隧道断面数据类别。

通过上述步骤完成地铁隧道断面数据采集, 为断面收敛测量提供支撑。

2.1.2 基于全站仪的隧道断面数据采集

本文为保证地铁隧道断面收敛变形测量精度, 采用全站仪测量隧道断面信息。全站仪是隧道工程测量普遍使用的设备, 是将全站仪部署在隧道贯通联测控制点上, 按照设定顺序进行隧道断面相对轨道面高的相应高度上, 隧道内壁测点坐标, 通过相关软件对坐标内的信息进行提取, 并生成断面绘制图, 以此完成隧道断面高程数据采集。该方法在测量过程中采用半自由设站断面测量方式完成, 整体测量流程如图1所示。

2.2 隧道断面多源数据融合

完成地铁隧道断面数据采集后, 由于采集的数据为多源数据, 其格式、类别等均存在显著差

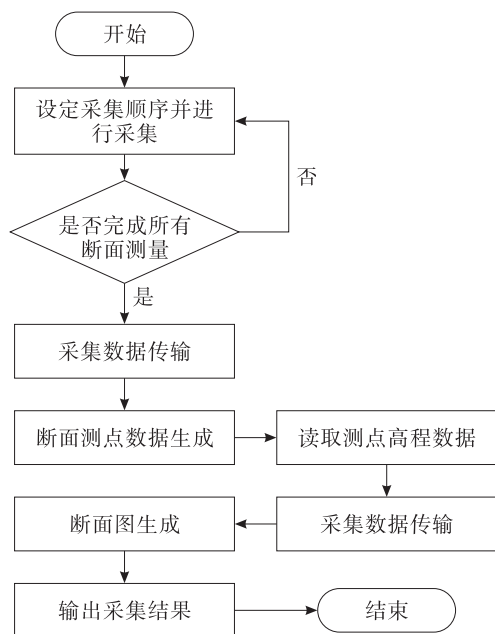


图1 基于全站仪的隧道断面数据采集

异。为确保断面收敛变形的测量精度^[10]，采用联邦学习算法完成采集的隧道数据融合。联邦学习算法是一种分布式机器学习方法，用于在保护数据隐私的前提下进行模型训练和数据融合。在联邦学习中，数据被分布在不同的设备、组织或个人之间，通过共享加密模型的方式进行协作，避免了传输原始数据的风险。数据融合通过使用聚合算法（如平均算法或加权平均算法）将各参与方的模型参数融合在一起，形成一个全局模型，提高了模型的准确性和性能。联邦学习算法数据融合的特点包括数据隐私保护、分布式计算、安全性和效率等。

该算法共包含特征提取模块、融合模块以及特征决策模块，其中特征提取模块主要是由特征提取自网络完成，用于完成异构数据特征提取；并且该算法在初始化过程中，中心节点能够完成3个模块参数的随机初始化，并传送至边缘节点中；边缘节点则依据节点上的数据集结构或者类别，确定对应的特征提取子网络，同时依据本地数据集完成3个模块的训练，完成训练后返回至中心控制节点，实现隧道断面多源异构数据融合。该算法的具体流程图如图2所示。

如果边缘节点用 $[E_1, E_2, \dots, E_N]$ 表示，其中， N 表示数量，算法的3个模块依次分别用 F 、 I 和 C 表示，数据融合公式为：

$$G = \langle F, I, C \rangle \quad (6)$$

式中： G 表示融合后的数据， $\langle \rangle$ 表示拼接操作。

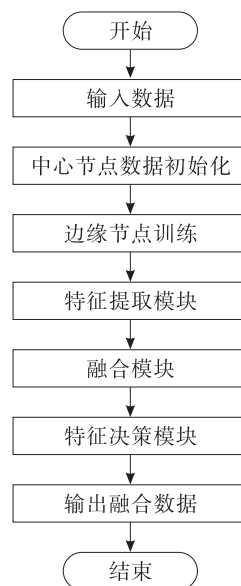


图2 联邦学习算法数据融合流程图

在进行隧道断面异构数据特征提取时，子网络用 $F = \langle F_1, F_2, \dots, F_M \rangle$ 表示；为保证多源异构隧道断面数据的融合效果，在 I 模块中构建异构数据空间维度特征高阶张量 W ，对其进行训练后获取多源数据的空间维度特征^[11]。 C 模块的主要作用是对融合后的数据特征进行训练，以此获取数据之间的关联，提升算法对于异构数据的处理能力。

如果2.1小节采集的待融合多源数据用 z_a 和 z_b 表示，通过两个不同的节点，分别对两种数据进行处理，即分别通过 F_a 和 F_b 两个子网络进行两种数据的特征提取，并进行两者的训练，获取两种数据的特征图结果，用 f_a 和 f_b 表示；结合节点中存在异构数据类别和数量，采用两个阶段完成特征融合，第一个阶段是以一阶单元为依据，将 W 和 f_a 进行模乘，获取新的 $\hat{W}$ 结果，该结果中包含 f_a 特征；第二个阶段是以二阶单元为依据，将第一单元获取的 $\hat{W}$ 结果和 f_b 进行模乘，以此获取包含 f_a 和 f_b 两种特征的融合张量，用 Γ 表示，相关计算公式为：

$$\begin{cases} \hat{W} = I(f_a, W) \\ \Gamma = I(f_b; \hat{W} | W) \end{cases} \quad (7)$$

通过该方式完成多源数据融合处理，能够充分完成各个多源数据的空间维度特征学习，同时可深入获取数据之间的关联情况。

节点 N 上的训练表达式为：

$$L_r^k = L_{r-1}^k - \eta g_r^k \quad (8)$$

式中：节点 k 在第 r 次迭代后的数据融合结果； η 表示学习率； g_r^k 表示梯度。

在融合过程中,各个边缘节点是利用特征提取器的自适应选择机制,完成特征提取模块的训练。并且在该过程中^[12],需采用归并的方式对每个特征提取的子网络进行处理,在此基础上获取数据融合模型,其主要是利用平均聚合算法完成,通过获取的模型包含多有多源数据特征,相关计算公式为:

$$F^* = \langle \sum_{k=1}^N \frac{n_1^k}{n_1} \times F_1^k, \sum_{k=1}^N \frac{n_2^k}{n_2} \times F_2^k, \dots, \sum_{k=1}^N \frac{n_M^k}{n_M} \times F_M^k \rangle \quad (9)$$

式中: F^* 表示更新后的特征提取模块; n_i 和 n_i^k 均表示样本数据,前者位于边缘节点 k 上,后者则为所有样本。在上述公式的基础上,获取第 r 次迭代时全局的数据融合模型结果 $G_r = \langle F^*, I^*, C^* \rangle$, 其计算公式为:

$$G_r = \langle F^*, I^*, C^* \rangle = \langle F^*, \sum_{k=1}^N \frac{m^k}{m} \times I^k, \sum_{k=1}^N \frac{m^k}{m} \times C^k \rangle \quad (10)$$

式中: m^k 、 m 均表示样本数量,前者位于边缘节点 k 上,后者则为所有样本。

依据上述公式即可完成地铁隧道断面多源数据融合,获取融合后的数据结果^[13],并将该结果用于收敛变形精准测量中。

通过将地铁隧道断面数据进行多源数据融合的优势:提高了数据的准确性,从多个来源收集数据并将其融合,得到更全面、更准确的地铁隧道断面信息;增强了数据完整性,可以涵盖不同视角和尺度的数据,实现了对地铁隧道断面的全面描述和完整分析;改善了空间分辨率,通过利用不同数据源之间的互补性,提高地铁隧道断面的空间分辨率;增加了数据可视化和分析能力,生成可视化的地铁隧道断面模型,便于工程师和决策者进行分析和决策;优化了工程决策,为工程师提供更全面的信息,帮助他们评估隧道工程的安全性和稳定性,并优化设计方案和施工决策。综上所述,地铁隧道断面多源数据融合为地铁隧道工程提供了准确、完整、详细的数据信息,增强了数据分析和决策能力,为地铁隧道的设计、施工和运营管理提供有力支持。

2.3 地铁隧道断面提取

为精准测量隧道断面收敛变形情况^[14],对融合后的数据进行批量切片处理,该处理采用隧道结构中心线完成。在处理过程中^[15],切片所在的横截面和隧道结构中心线垂直,以此可快速完成

地铁隧道断面提取。

假设 $O_i(X_i, Y_i, Z_i)$ 表示坐标点,且其位于提取的中线上,过该点的切向量用 $\zeta(l, m, n)$ 表示;依据两者的计算结果计算过 O_i 点的横截面 S , 公式为:

$$l(x - X_i) + m(y - Y_i) + n(z - Z_i) = 0 \quad (11)$$

依据式(11)对融合后的数据进行分割,使其形成具有一定厚度切片,依据该公式可计算切片中的任意点 $P_j(X_j, Y_j, Z_j)$ 和 S 之间的距离 D :

$$D = \frac{l(x - X_i) + m(y - Y_i) + n(z - Z_i)}{\sqrt{l^2 + m^2 + n^2}} \quad (12)$$

如果切片的厚度用 Δd 表示,当 $D \leq \frac{\Delta d}{2}$, 满足条件的断面点为 P_j , 对应断面点的几何公式为:

$$\Psi = \{P_j \in P \mid D \leq \frac{\Delta d}{2}\} \quad (13)$$

2.4 断面收敛精准测量

通过上述步骤完成地铁隧道断面提取后进行断面收敛变形测量,依据提取的断面结果,对其进行转换后构建隧道断面独立的平面坐标,并拟合隧道半径结果和设计结果之间的差值,即为断面收敛变形量。

如果转换后的坐标点用 (x_i, y_i) 表示,则圆的表达式为:

$$R^2 = (x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 \quad (14)$$

式中: (x_0, y_0) 表示圆心坐标; R 表示圆的半径。

测点 (x_i, y_i) 的误差计算公式为:

$$\varepsilon_i = \sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2} - R \quad (15)$$

式中: ε_i 可以表示点 i 和圆周的垂直距离,则式(15)可转换成:

$$\varepsilon_i = \left(-\frac{x_i - x_0}{\varphi_i} - \frac{y_i - y_0}{\varphi_i} \right) \begin{pmatrix} \frac{\partial x_0}{\partial R} \\ \frac{\partial y_0}{\partial R} \end{pmatrix} - l_i \quad (16)$$

式中: $\varphi_i = \sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2}$, $l_i = R - \sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2}$ 。

圆心坐标的初始值采用所有测定点的平均坐标值表示,半径初始值为设计结果,依据上述公式即可获取隧道平面圆心坐标,从上方中心位置开始顺时针计算实测点和圆心之间的距离,并将该结果和设计结果进行对比,可获取两者之间的差值,实现断面收敛变形精准测量。

3 测试分析

以某城市的地铁工程为例，验证本文方法对于地铁隧道断面收敛变形的测量效果。该地铁全长 35.02 km，地铁隧道建设完成后，需对地铁隧道中心进行测量，判断其和设计结果之间的偏差情况，并对修建完成的地铁隧道断面进行收敛变形测量，判断其是否满足工程设计标准，保证地铁的安全运营。为降低测试耗时，本文仅以隧道的部分区间路段为例，该区间长度为 1000 m，区间线路平面曲线最大半径和线间距分别为 2500 m 和 15 m，该线路整体纵向呈现 V 字坡。

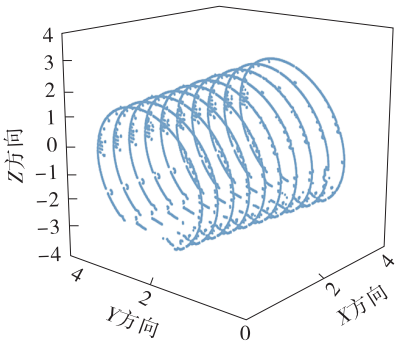
采用激光扫描仪和全站仪采集该测试区间隧道断面数据，其中激光扫描仪型号为 FAROS150，属于螺旋扫描仪。该设备在进行数据采集过程中，为保证采集数据的精准性，每扫描 100 m 进行一次里程矫正。全站仪型号为 ZT30R Pro，两种设备的参数如表 1 所示。通过上述设备采集隧道断面数据 10 000 个，作为测试数据。

表 1 数据采集设备的相关参数

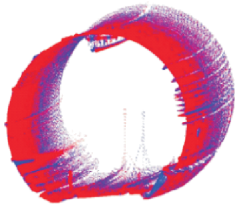
参数		数值
激光扫描仪	测距精度/mm	± 1
	垂直视场/°	300
	水平视野/°	360
	垂直角精度	± 19"
	水平角精度	± 19"
	可视范围 kpts/s	980
	前进方向分辨率/mm	≤ ± 5
	断面方向分辨率/mm	≤ ± 1
	断面测量精度/mm	≤ ± 1
	扫描频率/Hz	100
全站仪	孔径/mm	44
	测程/m	0 ~ 3500
	放大倍率	30 ×
	视场	1°30′
	最短视距/m	17
精度		2"

图 3 为随机呈现的隧道断面激光扫描数据采集结果。由图可知，采用本文方法能有效获取隧道整体的激光点云数据，且数据分布较为均匀，不存在显著的数据缺失或数据集中分布现象，因此本文方法具有较好的隧道数据采集能力，可为隧道断面收敛测量提供可靠依据。

以采集的隧道信息为基础，对其进行融合处理后，依据融合后的数据结果进行隧道断面椭圆度计算，以此分析本文方法对于断面数据的计算效果，图 4 为一个断面环的计算结果。分析图 4



(a) 隧道激光扫描点云分布



(b) 点云数据采集结果

图 3 数据采集能力测试结果

可知，本文方法依据采集的隧道数据能够有效完成隧道断面椭圆度计算，且计算结果能呈现断面的椭圆度变化情况，能够依据椭圆度的变化情况，分析隧道断面是否合格。

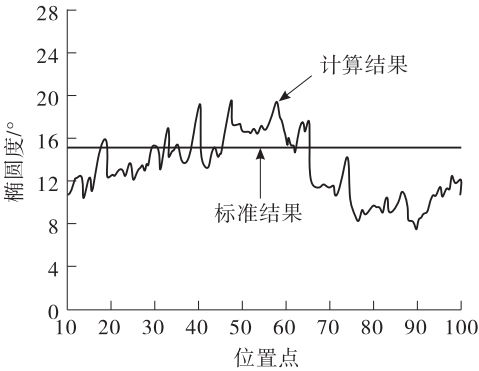


图 4 隧道断面椭圆度计算结果

为进一步验证多源数据融合的精准度，将激光扫描仪和全站仪采集的数据作为对比数据，对不同角度数据采集精度进行对比，采集精度计算公式如下：

$$\xi = \frac{S}{T} \times 100\%$$

(17)

式中， S 表示采集数据的值， T 表示实际数据的值。

对比结果如表 2 所示。

由表 2 可知，采用多源数据融合后的数据精准度要高于激光扫描仪和全站仪采集的数据，精准度最高为 98.5%。说明经过融合后数据精准度更高，可以更好地为后续实验提供基础数据。

表 2 不同角度数据采集精度

位置角度/°	激光扫描 数据/%	全站仪采集 数据/%	多源数据 融合/%
20	95.0	94.3	98.5
40	94.9	93.5	97.8
60	95.4	94.2	96.7
80	94.3	93.5	97.4
100	95.8	94.6	98.2
120	94.9	93.4	97.9

隧道平面拟合是收敛变形测量的重要步骤，为进一步验证本文方法的应用效果，依据采集的数据结果进行隧道断面提取和拟合，拟合结果如图 5 所示。

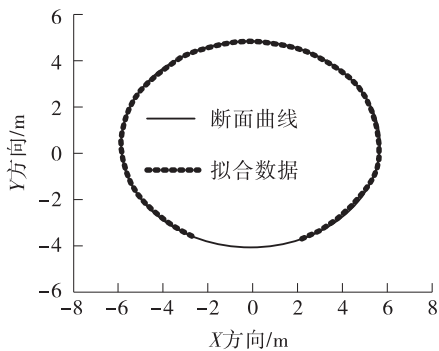


图 5 隧道断面拟合结果

分析图 5 可知，本文方法能够依据采集的隧道数据完成隧道平面拟合，呈现隧道断面的平面情况，并且拟合的数据结果均分布在断面曲线上。因此，本文方法应用效果较好，能够完成隧道断面拟合，为断面收敛变形的精准测量提供可靠依据。应用本文方法对隧道不同角度下的变形量进行测量，结果如表 3 所示。

表 3 隧道不同角度下的变形量测量结果

位置角度/°	收敛变形量/mm	位置角度/°	收敛变形量/mm
0	0	180	0
20	19.6	200	0
40	3.3	220	0
60	-9.7	240	15.8
80	-21.2	260	27.5
100	30.1	280	-17.9
120	17.4	300	-4.2
140	0	320	13.1
160	0	340	29.8

分析表 3 可知，本文方法能够依据实测点和圆心之间的距离计算结果，完成隧道断面收敛变形的测量并获取各个位置的收敛变形量测量结果，其中在角度为 140°~220°时，隧道断面变形量结果为 0 mm；角度为 100°和 340°时，断面收

敛变形量最大，最大值达 30.1 mm。

对比不同方法在隧道不同角度下的变形量测量结果，结果如表 4 所示。由表 4 可知，本文方法对隧道不同角度下的变形量测量结果与实际结果一致，而激光扫描仪测量方法和全站仪测量方法的测量结果均与实际结果存在偏差。说明本文方法的测量结果更准确，实际应用效果好，可以满足地铁隧道的测量要求。

表 4 三种方法的变形量测量结果

位置角度/°	实际收敛 变形量/mm	本文方法 测量值/mm	激光扫描仪 测量值/mm	全站仪 测量值/mm
20	19.6	19.6	19.6	20.1
40	3.3	3.3	3.5	3.3
60	-9.7	-9.7	-8.5	-9.4
80	-21.2	-21.2	-21.2	-23.1
100	30.1	30.1	30.9	30.1
120	17.4	17.4	18.7	17.9
140	0	0	2.5	0

基于上述实验，统计不同方法完成隧道不同角度下的变形量累计测量的时间，如表 5 所示。

表 5 三种方法的累计测量时间

位置角度/°	整体测量 次数/次	本文测量 值/s	激光扫描仪 测量值/s	全站仪 测量值/s
20	50	850	1250	1400
40	50	950	1350	1550
60	50	1050	1200	1450
80	50	1100	1500	1700
100	50	1000	1400	1500
120	50	1250	1300	1400
140	50	1200	1450	1600

由表 5 可知，本文方法在隧道不同角度下的变形量累计测量时间均小于激光扫描仪测量方法和全站仪测量方法，说明本文方法的测量速度更快。同时在上述方法中，本文方法的人力投入为 10 人，物力投入为 20 万元；激光扫描仪测量方法的人力投入为 15 人，物力投入为 30 万元；全站仪测量方法的人力投入为 20 人，物力投入为 40 万元。本文方法的测量效率更高。

4 结论

地铁隧道建设中，收敛变形检测有助于全面分析隧道的安全状况，确保地铁隧道的运营安全和使用寿命。基于此，本文提出基于多源数据融合的地铁隧道断面收敛精准测量方法。

(1) 该方法主要通过激光扫描仪和全站仪采
(下转第 39 页)

- 版),2019,51(04):551-558.
- [3] 汤明. 双塔单索面大悬臂钢-STC组合桥面斜拉桥受力性能的研究[J]. 公路,2018,63(07):216-221.
- [4] 张士红. 带开口肋的轻型组合桥面板基本性能研究[D]. 长沙:湖南大学,2016.
- [5] 邵旭东,蔡文涌,曹君辉,等. 型钢-UHPC轻型组合桥面板及其抗弯性能研究[J]. 土木工程学报,2024,57(6):152-168.
- [6] 丁楠,邵旭东. 轻型组合桥面板的疲劳性能研究[J]. 土木工程学报,2015,48(01):74-81.
- [7] 邵旭东,郑晗,黄细军,等. 钢-UHPC轻型组合桥面板横向受力性能[J]. 中国公路学报,2017,30(09):70-77,85.
- [8] 裴必达,李立峰,邵旭东,等. 钢-UHPC轻型组合桥面板实桥试验研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版),2019,46(01):76-84.
- [9] 广东省交通运输厅. 超高性能轻型组合桥面结构技术规范:GDJTG/T A01—2015[S]. 2015.
- [10] 戴君. 钢-UHPC组合桥面板力学性能分析与试验研究[D]. 西安:长安大学,2021.
- [11] 段林利. 抗拔不抗剪连接钢-混凝土组合框架结构受力性能研究[D]. 长沙:湖南大学,2020.
- [12] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 桥梁用结构钢:GB/T 714—2015[S]. 北京:中国标准出版社,2015.
- [13] 中华人民共和国交通运输部. 公路桥涵设计通用规范:JTG D60—2015[S]. 北京:人民交通出版社,2015.
- [14] 中华人民共和国交通运输部. 公路钢结构桥梁设计规范:JTG D64—2015[S]. 北京:人民交通出版社,2015.

(上接第20页)

集隧道断面的点云数据和高程数据,通过联邦学习算法融合采集的隧道多源数据,通过综合不同类型的测量仪器和传感器的数据,扩展测量覆盖范围的同时消除各种误差,大幅提高了测量精度和可靠性。

(2) 利用隧道结构中心线方法批量切片处理融合后的数据,快速提取地铁隧道断面。相比传统的手动切片方法,这种自动化的批量处理方式能够大大提高效率,节约时间和人力成本。

(3) 对以上数据进行转换后构建隧道断面独立平面坐标,并拟合隧道半径结果和设计结果之间的差值,可获取断面收敛变形量,从而精准评估隧道断面的收敛变形量。

(4) 实验结果显示,本文方法具有较好的应用效果,能够可靠完成隧道数据采集并完成断面拟合,计算断面收敛变形结果。角度在 100° 和 340° 时,断面收敛变形量最大,最大值达到30.1 mm。

参考文献:

- [1] 廖胤齐,王智. 移动三维扫描支持下的地铁盾构隧道收敛测量技术应用研究[J]. 测绘通报,2022(S2):77-80.
- [2] 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(09):63-68.
- [3] 潘东峰,杨超,吴一同,等. 利用TLS技术进行地铁隧道断面提取及变形监测分析[J]. 测绘通报,2022,541(04):130-133.
- [4] 陈虹宇,吴贤国,张浩蔚,等. 基于物联网的运营地铁隧道结构健康监测系统软件平台开发[J]. 城市轨道交通研究,2021,24(01):93-96,106.
- [5] 张鸿飞,王小龙,薛亚东,等. 基于知识图谱的盾构隧道服役状态评估[J]. 现代隧道技术,2022,59(04):58-68.
- [6] 贺磊,蔡乾广,许诚权,等. 地铁盾构断面椭圆度检测及数据分析研究[J]. 都市快轨交通,2021,34(03):104-107,118.
- [7] 李翔宇,李新源,李明宇,等. 基于实测数据的地铁隧道长期沉降预测模型研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版),2021,53(02):186-193.
- [8] 李照众,王浩,畅翔宇,等. 基于组合模型的高铁隧道围岩收敛变形预测[J]. 东南大学学报(自然科学版),2021,51(05):851-858.
- [9] 王姝,任玉,关展旭,等. 基于差异信息量的多源数据融合方法[J]. 东北大学学报(自然科学版),2021,42(09):1246-1253.
- [10] 莫慧凌,郑海峰,高敏,等. 基于联邦学习的多源异构数据融合算法[J]. 计算机研究与发展,2022,59(02):478-487.
- [11] 李瀚源,李兴高,刘浩. 隐伏正断层运动下盾构隧道结构力学响应分析[J]. 现代隧道技术,2021,58(S1):29-39.
- [12] 丁孝兵,高志强,杨坤. 基于惯导和CPⅢ控制点的地铁隧道移动激光扫描三维点云重建[J]. 测绘通报,2021,534(09):112-115,129.
- [13] 张研沁,狄宏规,徐永刚. 基于机器学习的地铁盾构隧道长期沉降预测[J]. 都市快轨交通,2022,35(03):89-94.
- [14] 赵宁宁,王嘉伟,芦斌,等. 光电测量方法在盾构隧道收敛监测中的可行性研究[J]. 铁道标准设计,2022,66(12):111-114,136.
- [15] 张立伟. 特大断面公路隧道力学响应数值仿真[J]. 计算机仿真,2021,38(02):101-105.