

DOI: 10.13203/j.whugis20120122

文章编号: 1671-8860(2014)08-0981-06

一种隧道整体变形监测方法及其应用

刘绍堂¹ 刘文锴¹ 周跃寅²

¹ 河南工程学院土木工程学院,河南 郑州,451191

² 同济大学测量与地理信息学院,上海,200092

摘要: 提出了采用隧道多点整体监测取代传统单点监测的方法,将三维激光扫描技术应用于隧道变形监测领域,介绍了作业流程和作业中应注意的问题,讨论了点云配准和坐标转换问题,给出了应用实例。研究表明,采用 ICP 配准方法在隧道进行外业扫描的测站距离不能超过隧道直径,外业扫描的合理分辨率以高分辨率为宜,当扫描遮挡率过大时,为了避开障碍物影响需要在隧道中心线两侧分别扫描;采用本方法可以一次快速、全面地获取隧道表面的完整数据,克服了传统方法的不足。

关键词: 隧道变形监测;三维激光扫描;收敛监测;隧道变形分析

中图法分类号:P258

文献标志码:A

近几年,地面三维激光扫描技术开始应用于地铁隧道收敛变形监测中。早期的激光仪器仅限于隧道指向和隧道断面检测,文献[1]对三维激光影像扫描仪测绘成果的误差成因、误差影响方式进行了分析。文献[2]提出了一种在不中断地铁正常运营的情况下得到地铁整个变形区域三维数据形变的方法。文献[3]指出激光扫描数据的误差存在于径向方向。文献[4]研究认为采用三维激光扫描仪进行隧道安全监测的方法将成为未来隧道工程安全监控的主要方法。文献[5]在钻爆法施工隧道中开展了三维激光影像扫描技术的应用研究;文献[6]提出了一种基于三次多项式插值曲面拟合的隧道整体变形监测方法。文献[7]提出了一种应用于变形监测的,基于三维激光点云的隧道断面连续截取方法,该方法能够快速准确地提取出隧道的形变信息。文献[8]运用基于点云法向量差异的点云分割算法对点云数据进行抽稀,使用抽稀后的点云数据构建地铁隧道模型从而对隧道进行整体变形分析,变形监测精度在4 mm以内。文献[9]研究了隧道变形监测断面拟合方法和激光扫描仪监测隧道变形的精度。激光扫描在其他领域的研究成果更为丰硕^[10],但多没有针对隧道环境的特殊性。基于此,本文提出了一种用隧道多点整体监测取代传统的单点监测的方法,并给出应用实例。

1 基于三维激光扫描技术的隧道收敛变形监测流程

隧道变形监测工作流程如图1所示。

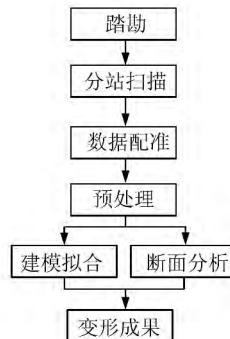


图1 隧道变形监测的流程

Fig. 1 Tunnel Deformation Monitoring Process

采用三维激光扫描仪获取隧道实体的三维坐标,扫描过程中依据其配套软件的功能,可以采取两种扫描方法:第一种方法是将仪器架设在控制点上对中整平后输入控制点坐标,将标靶架设在后视控制点上进行定向,然后扫描,这样扫描的多站点云数据不需要配准,这种方法的缺点是测站数量多,控制测量工作量大,操作繁琐耗时较长。第二种方法是将标靶架设在控制点上,扫描仪任意架站,每连续不同站有相同的标靶作为同名

收稿日期: 2013-01-22

项目来源: 河南省重点科技攻关计划资助项目(122102210421); 河南省教育厅科技攻关计划资助项目(2010A420001)。

第一作者: 刘绍堂,教授,主要从事测绘工程教学和研究工作。E-mail: lst707@163.com

点,扫描结束后可以依据数据处理软件将控制点坐标加入到标靶拟合中心点上,采用后方交会将测站点计算并转入大地坐标系中。这种方法的优点是方便快捷,缺点是后续数据处理需要专门配准。对于平行隧道或者双拱隧道,为了发现垂直方向或水平方向的整体平行移动,需要采用大地测量方法用标靶配准方法在隧道内进行扫描和观测,对大多数的隧道,为反映隧道的整体变形情况,只需要对隧道的收敛情况进行准确检测。

2 数据采集

数据采集要综合考虑隧道直径(或者地下空间的尺寸)、隧道表面的粗糙度、扫描仪精度、隧道表面的反射率、隧道预期变形大小、用户的数据处理能力、数据采集和数据处理的时间等因素。

2.1 扫描合理分辨率的选择

较大区域的隧道扫描,扫描仪和目标之间的距离增加,为保持相同的扫描点密度则必须选择较高的扫描分辨率。但扫描分辨率过高,会增加数据处理的难度和工作量,需要提高计算机的数据处理能力。再者,扫描分辨率的大小直接影响扫描时间。因此,对隧道变形监测而言,通常建议选择中分辨率或者高分辨率。以徕卡 HDS6000 扫描仪为例,推荐分辨率设置如表 1 所示。

表 1 扫描分辨率、扫描时间及数据大小

Tab. 1 Scan Resolution, Scan Time and Data Size

扫描分辨率	扫描时间	数据大小/MB
预览	25"	3
中	1'40"	50
高	3'22"	200
特高	6'44"	800
超高	26'40"	2 400

2.2 扫描站间距和扫描重叠度的确定

扫描站间距和测站位置确定的原则是保证扫描仪和扫描表面之间的最大入射角在 45°之内。为了能够扫描整个隧道,扫描站沿轴线的最大间距不能超过隧道直径(图 1)。为满足断面 ICP 法的配准需要,至少有 30% 的扫描重叠度,因此一站扫描隧道长度为隧道的直径至少外加直径 30%。等同于把扫描仪和扫描表面之间允许的入射角增加至约 55°(图 2)。若隧道壁附着物过多或隧道内存在大的遮挡障碍物,建议在隧道中心线两侧分别设站进行扫描,避开其影响。

虽然徕卡 HDS 6000 扫描仪测程为 79 m,但其推荐的最大扫描距离是 17 m。因此,如果沿隧

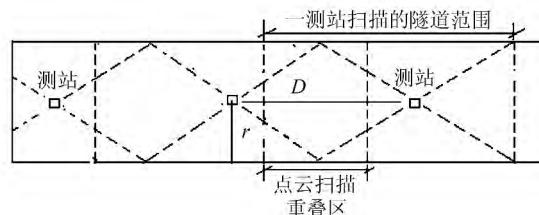


图 2 扫描站间距和扫描重叠度

Fig. 2 Scanning Station Spacing and Scan Overlap

道中心线设站进行扫描,扫描仪扫描隧道的最大直径不得大于 20 m(图 3)。

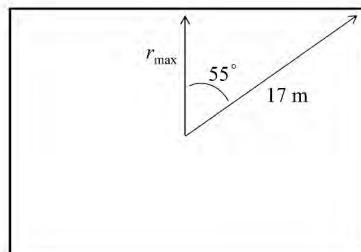


图 3 扫描最大隧道半径计算

Fig. 3 Maximum Tunnel Radius Calculation

其计算依据为: $r_{\max} = 17 \cdot \cos 55^\circ = 9.75 \text{ m}$, 所以 $D = 2r = 20 \text{ m}$ 。

扫描隧道或其他更大的区域需要设置不同的扫描站间距。扫描站间距必须与三维环境相适应,确保扫描到所有的壁板、顶板和地板。如果隧道或地下空间明显高于 17 m,为保证足够的扫描密度,有必要改变扫描设站位置,在隧道的较高位置架设仪器,或者以足够的扫描分辨率增加扫描点密度。

3 数据处理

利用三维激光扫描仪获取隧道体点云数据后,必须要进行数据处理,为后续的变形分析与提取做好必要准备。首先,隧道是大型复杂结构,扫描时需多站扫描,必须进行点云数据配准;其次,在扫描过程中难免会有冗余数据、噪声等,点云数据去噪、缩减也是数据处理的重要步骤。

3.1 数据过滤

数据过滤可由用户驱动或使用滤波算法完成。用户驱动的数据过滤可以消除明显异常的扫描对象。但用该方法消除小的近表异常太过耗时,并不实用。小的近表异常必须使用过滤算法筛选,比如 Delaloye 开发的算法^[9]等。

在网格划分和断面提取之前必须过滤掉近表异常;否则,它们将与岩体表面一起网格化。激光

扫描数据进行过滤后,点云可以转换用于提取横断面的表面模型。

3.2 断面提取与断面分析

横断面提取有两种方法,一种为根据隧道表面模型提取断面,另一种为使用原始点云提取断面。后者是对窄条状的数据进行比较,在一个小范围内进行窄条状数据的比较,允许小范围内求平均值,降低了选择相同断面数据所需的精度。应用窄条状的数据的另一个好处是扫描中的噪音和粗糙度被平均掉,因为在数据分析中始终把这些点看作一个断面内的点。

横断面提取要小心谨慎,确保每期提取的横断面位于相同(或尽可能接近)的位置;为了确保断面没有偏斜,横断面一定要垂直于隧道轴,误差控制在 $\pm 1^\circ$ 之内。对任意里程的断面求差即可表示该里程任何位置的变形^[11]。

4 隧道扫描点云配准与坐标转换

4.1 点云配准

隧道配准和拼接就是要寻找并求得不同测站上的公共点坐标(又称同名点),然后根据公共点坐标将不同测站测量的点云转换到同一坐标系中,形成一个整体。配准的主要方法有以下三种:
① 靶标配准;② 点云配准;③ 根据测站坐标和定向点坐标配准。

点云数据配准就是使两幅点云数据同名点的点对(p_i, q_i)满足相同的变换矩阵 T , 满足如下方程:

$$\forall p_i \ni P, \exists q_i \ni Q, \|Tp_i - q_i\| = 0 \quad (1)$$

式中, P 和 Q 分别是两次扫描的点集; p_i 和 q_i 分别是点集 P 和 Q 中的某点。

然而,在实际求解方程(1)时常面临如何查找点对和如何求解矩阵 T 的问题,因此,可以用所有同名点匹配误差的大小来衡量配准的好坏:

$$E = \sum_{i=1}^{N_p} \|Tp_i - q_i\|^2, q = \min \|Tp_i - q\| \quad (2)$$

式中, E 为配准误差。

三维激光扫描数据处理软件的配准模块支持两种配准方式,一是基于点云的配准,二是基于目标的配准。基于点云的配准是在两幅扫描影像中,手动找出三个同名点,软件自动搜索计算,最终实现两幅点云的配准;基于目标的配准是指在两幅或者多幅点云影像中,任意两幅点云有两个或两个以上同名标靶,将标靶作为目标进行标靶

匹配,软件自动将多幅点云配准到一起。有的软件还有一种将点云数据转换到大地坐标系的功能,主要方法是先将标靶的大地坐标输入到软件中,然后通过标靶将点云数据配准到大地坐标系中,称为基于大地控制点的配准。

在隧道变形监测中,选用基于点云的配准算法,选取三个特征点进行粗配准,然后依照式(1)算法进行精化实现精确配准。配准结果精度可达 3 mm。

4.2 坐标转换

1) 左右手坐标系换算

三维激光扫描仪可以架设在控制点上进行后视标靶,即进行传统测量的定位、定向之后,再进行扫描。理论上,在同一个控制网中架站测量时,坐标应该是一致的,但是全站仪是左手坐标系,而三维激光扫描仪是右手坐标系,因此,左右手坐标系的坐标转换是必须处理的。假设一个控制点使用全站仪测量坐标为(X, Y, Z),扫描仪扫描的坐标为(x, y, z),测站点坐标为(X_0, Y_0, Z_0),则有下面转换关系:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \left(\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{bmatrix} \right) \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

2) 特征点坐标转换模型

考虑到三维激光扫描仪自身采用的坐标系与实际坐标系的欧拉角会很大,在纠正中,采用小角度的空间直角坐标转换效果不太理想^[12]。解决这一问题的主要思想是:将旋转矩阵中的 9 个方向余弦都设为未知项,再加上 3 个平移量和 1 个尺度,总共 13 个未知数;由于旋转矩阵中只有 3 个独立参数,根据旋转矩阵的正交特性,可以列出 6 个条件方程式;若有 n 个公共点,则可以列出 $3n$ 个观测方程;另外,旋转矩阵中,9 个参数可以列出 6 个条件,如果将这 6 个条件式作为条件方程,按照附有条件的间接平差方法解算,就可以得出 13 个未知数的最小二乘解^[13]。

设点 P 在空间直角坐标系 $O-XYZ$ 中的三维坐标为(X, Y, Z),在空间直角坐标系 $o-xyz$ 中的三维坐标为(x, y, z), $O-XYZ$ 与 $o-xyz$ 的关系如图 4 所示。可以认为 x 轴在 $O-XYZ$ 坐标系中的方向余弦为(a_1, b_1, c_1), y 轴在 $O-XYZ$ 坐标系中的方向余弦为(a_2, b_2, c_2), z 轴在 $O-XYZ$ 坐标系中的方向余弦为(a_3, b_3, c_3)。则可得出 X 轴在 $o-xyz$ 中的方向余弦为(a_1, a_2, a_3), Y 轴在 $o-xyz$ 中的方向余弦为(b_1, b_2, b_3), Z 轴在 $o-xyz$ 中的方向

余弦为 (c_1, c_2, c_3) 。令尺度参数为 μ , o -xyz的原点相对于 O -XYZ原点的平移向量为 (X_0, Y_0, Z_0) ,则有如下关系:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_i = \mu \begin{bmatrix} a_1 & a_2 & a_3 \\ b_1 & b_2 & b_3 \\ c_1 & c_2 & c_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}_i + \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

令旋转矩阵 $H = \begin{bmatrix} a_1 & a_2 & a_3 \\ b_1 & b_2 & b_3 \\ c_1 & c_2 & c_3 \end{bmatrix}$,若 H 满足关系

$HH^T = H^T H = E$,则 H 为正交矩阵,其相应的变换为正交变换,则有下式:

$$\begin{cases} a_1^2 + a_2^2 + a_3^2 = 1 \\ b_1^2 + b_2^2 + b_3^2 = 1 \\ c_1^2 + c_2^2 + c_3^2 = 1 \\ a_1 a_2 + b_1 b_2 + c_1 c_2 = 0 \\ a_1 a_3 + b_1 b_3 + c_1 c_3 = 0 \\ a_2 a_3 + b_2 b_3 + c_2 c_3 = 0 \end{cases} \quad (5)$$

H 中有3个独立参数,其余6个参数为非线性函数,直接解算很复杂,可以设未知数为3个平移参数、1个尺度、9个方向余弦参数,将式(4)采用泰勒级数展开:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_i = \begin{bmatrix} X_0^0 \\ Y_0^0 \\ Z_0^0 \end{bmatrix} + \mu \begin{bmatrix} a_1^0 & a_2^0 & a_3^0 \\ b_1^0 & b_2^0 & b_3^0 \\ c_1^0 & c_2^0 & c_3^0 \end{bmatrix} \cdot$$

$$\begin{aligned} \mathbf{X} &= [dX_0 \quad dY_0 \quad dZ_0 \quad d\mu \quad da_1 \quad da_2 \quad da_3 \quad db_1 \quad db_2 \quad db_3 \quad dc_1 \quad dc_2 \quad dc_3]^T; \\ \mathbf{A}_i &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_1^0 x_i + a_2^0 y_i + a_3^0 z_i & \mu^0 x_i & \mu^0 y_i & \mu^0 z_i & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & b_1^0 x_i + b_2^0 y_i + b_3^0 z_i & 0 & 0 & 0 & \mu^0 x_i & \mu^0 y_i & \mu^0 z_i & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & c_1^0 x_i + c_2^0 y_i + c_3^0 z_i & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \mu^0 x_i & \mu^0 y_i & \mu^0 z_i \end{bmatrix}; \\ \mathbf{L}_i &= \begin{bmatrix} X_0^0 \\ Y_0^0 \\ Z_0^0 \end{bmatrix} + \mu_0 \begin{bmatrix} a_1^0 & a_2^0 & a_3^0 \\ b_1^0 & b_2^0 & b_3^0 \\ c_1^0 & c_2^0 & c_3^0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}_i - \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_i. \end{aligned}$$

由于 $a_1, a_2, a_3, b_1, b_2, b_3, c_1, c_2, c_3$ 是相关的,

由式(5)可以列出以下条件方程:

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 2a_1^0 & 2a_2^0 & 2a_3^0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2b_1^0 & 2b_2^0 & 2b_3^0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2c_1^0 & 2c_2^0 & 2c_3^0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & a_2^0 & a_1^0 & 0 & b_2^0 & b_1^0 & 0 & c_2^0 & c_1^0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & a_3^0 & 0 & a_1^0 & b_3^0 & 0 & b_1^0 & c_3^0 & 0 & c_1^0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_3^0 & a_2^0 & 0 & b_3^0 & b_2^0 & 0 & c_3^0 & c_2^0 \end{bmatrix};$$

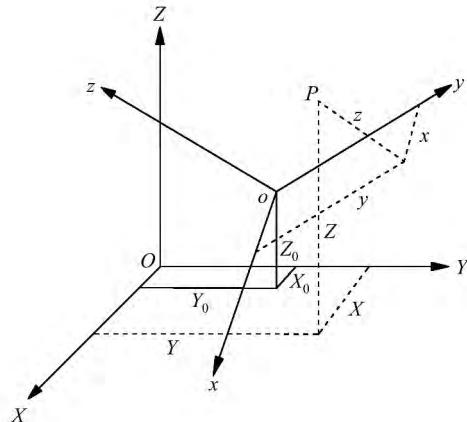


图4 坐标转换示意图

Fig. 4 Schematic of Coordinate Transformation

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}_i &+ \begin{bmatrix} dX_0 \\ dY_0 \\ dZ_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} a_1^0 x_i + a_2^0 y_i + a_3^0 z_i \\ b_1^0 x_i + b_2^0 y_i + b_3^0 z_i \\ c_1^0 x_i + c_2^0 y_i + c_3^0 z_i \end{bmatrix} d\mu + \\ &\begin{bmatrix} \mu^0 x_i & \mu^0 y_i & \mu^0 z_i & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \mu^0 x_i & \mu^0 y_i & \mu^0 z_i & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \mu^0 x_i & \mu^0 y_i & \mu^0 z_i \end{bmatrix} \cdot \\ &\begin{bmatrix} da_1 & da_2 & da_3 & db_1 & db_2 & db_3 & dc_1 & dc_2 & dc_3 \end{bmatrix}^T \end{aligned} \quad (6)$$

式中,上标为0的参数为近似值, $dX_0, dY_0, dZ_0, d\mu, da_1, da_2, da_3, db_1, db_2, db_3, dc_1, dc_2, dc_3$ 为改正数,将式(6)写成误差方程式:

$$\mathbf{V}_i = \mathbf{A}_i \mathbf{X} + \mathbf{L}_i \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (7)$$

$$\text{式中}, \mathbf{V}_i = [V_{X_i} \quad V_{Y_i} \quad V_{Z_i}]^T;$$

$$\mathbf{A}_i = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_1^0 x_i + a_2^0 y_i + a_3^0 z_i & \mu^0 x_i & \mu^0 y_i & \mu^0 z_i & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & b_1^0 x_i + b_2^0 y_i + b_3^0 z_i & 0 & 0 & 0 & \mu^0 x_i & \mu^0 y_i & \mu^0 z_i & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & c_1^0 x_i + c_2^0 y_i + c_3^0 z_i & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \mu^0 x_i & \mu^0 y_i & \mu^0 z_i \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{B}\mathbf{X} + \mathbf{W} = 0 \quad (8)$$

式中,

$$W = \begin{bmatrix} a_1^0 + a_2^0 + a_3^0 - 1 \\ b_1^0 + b_2^0 + b_3^0 - 1 \\ c_1^0 + c_2^0 + c_3^0 - 1 \\ a_1^0 a_2^0 + b_1^0 b_2^0 + c_1^0 c_2^0 \\ a_1^0 a_3^0 + b_1^0 b_3^0 + c_1^0 c_3^0 \\ a_2^0 a_3^0 + b_2^0 b_3^0 + c_2^0 c_3^0 \end{bmatrix}; \text{按照附有条件的}$$

间接平差解算,便可得到 $X^{[14]}$ 。

5 应用

某圆形隧道,隧道直径为 13 m,扫描采用高速模式扫描长度 800 m,通过外业数据采集获得总数据量为 47 GB。整个外业采用高分辨率扫描模式,站间距 10~13 m,站间扫描重叠度不小于 2 m,每站扫描长度 12~15 m。内业数据处理采用随机软件配合 MATLAB 编程进行,采用 CIP 配准方法,利用隧道中的轨道、螺栓等边缘清晰的设备及其他特征点、线的交会点迭代十几次甚至更多的次数完成站间点云粗拼接和精拼接;在同一里程通过对两期扫描数据的断面提取、断面拟合、断面求差,即可获得该里程断面的变形曲线、变形量等,如图 5 所示。结果表明,两期隧道断面收敛最大值在 18 mm 以内,拱顶下沉在 8 mm 以内。隧道断面的变形接近一个扁平椭圆的结构,与传统测量方法一致。由于两期断面的求差部分消除了变形测量的系统误差,通过与全站仪和水准测量方法的结果比较,其变形测量的精度没有显著差异^[15],满足隧道变形监测的精度要求。

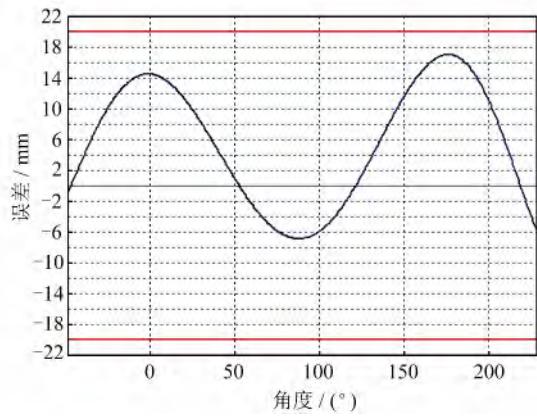


图 5 某断面的变形曲线

Fig. 5 Deformation Curve of a Section

6 结语

本文将三维激光扫描技术应用于隧道变形监

测中,用多点整体监测取代传统的单点监测方法。研究表明,采用 ICP 配准方法在隧道进行外业扫描的测站距离不能超过隧道直径,外业扫描的合理分辨率以高分辨率为宜,当扫描遮挡率过大时,为了避开障碍物影响,必要时需要在隧道中心线两侧分别进行扫描。虽然 ICP 配准方法可以提高工作效率,但若隧道已经建立了控制系统,则也可以采用标靶配准和大地测量配准方法。实验表明,采用本文方法,数据采集时间明显缩短,作业强度大大降低,监测周期大为缩短,重要的是可以一次快速、全面地获取隧道表面的完整数据,克服了传统方法的不足。

参 考 文 献

- [1] Luo Dean, Zhu Guang, Lu Li, et al. The Overall Deformation Monitoring Based on Three-dimensional Laser Scanning Technology[J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2005, 7: 40-42(罗德安,朱光,陆立,等. 基于三维激光影像扫描技术的整体变形监测[J]. 测绘通报, 2005, 7: 40-42)
- [2] Qiu Dongwei, Liang Qinghuai, Yang Songlin. Beijing Subway Tunnel Deformation Monitoring of the Whole Structure [J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2008, 1: 16-17(邱冬伟,梁青槐,杨松林. 北京地铁隧道结构整体变形监测的研究[J]. 测绘科学, 2008, 1: 16-17)
- [3] Bai Tingyi. Tunnel Surface Reconstruction Technology Research Based Laser Scanning Data [D]. Qingdao: Shandong University of Science and Technology, 2010(白廷义. 基于激光扫描数据的隧道曲面重建技术研究[D]. 青岛: 山东科技大学, 2010)
- [4] Hou Haimin. Application of 3Dimensional Laser Scanner in Qingdao Jiaozhou Bay Tunnel[J]. *Tunnel Construction*, 2010, 30(6): 693-696(侯海民. 三维激光扫描仪在青岛胶州湾海底隧道的应用[J]. 隧道建设, 2010, 30(6): 693-696)
- [5] Fekete S, Diederichs M, Lato M. Geotechnical and Operational Applications for 3-dimensional Laser Scanning in Drill and Blast Tunnels[J]. *Tunneling and Underground Space Technology*, 2010, 25(5): 614-628
- [6] Jian Xiao, Tong Peng. Tunnel Deformation Monitoring Method Based Laser Radar Technology [J]. *Railway Investigation and Surveying*, 2011, 37(6): 19-22(简骁,童鹏. 基于地面激光雷达技术的隧道变形监测方法研究[J]. 铁道勘察, 2011, 37(6): 19-22)
- [7] Tuo Lei. Subway Tunnel Deformation Monitoring Based on 3D Laser Scanning Data[D]. Beijing: Chi-

- na University of Geosciences (Beijing), Canada; Queen's University, 2012(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(北京), 2012)
- [8] Li Jian, Wan Youchuan, Jiang Menghua, et al. Tunnel Deformation Monitoring Based Laser Scanning Technology [J]. *Geospatial Information*, 2012, 1: 14-17(李健,万幼川,江梦华,等. 基于地面激光技术的隧道变形监测技术[J]. 地理空间信息, 2012, 1: 14-17)
- [9] Delaloye D. Development of a New Methodology for Measuring Deformation in Tunnels and Shafts with Terrestrial Laser Scanning(LiDAR) Using Elliptical Fitting Algorithms[D]. Canada: Queen's University, 2012
- [10] Rok V, Tomaz A, Oskar S, et al. Use of Terrestrial Laser Scanning Technology for Long Term High Precision Deformation Monitoring [J]. *Sensors*, 2009, 9: 873-9 895
- [11] Liu Shaotang, Pan Jiechen. A Tunnel Overall Convergence Deformation Presentation Method [J]. *Modern Tunnelling Technology*, 2013, 50(10):77-81(刘绍堂,潘洁晨. 一种隧道整体收敛变形表达方法[J]. 现代隧道技术, 2013, 10:77-81)
- [12] Chen Yi, Shen Yunzhong, Liu Dajie. A Simple Three-dimensional Datum Transformation Model Suitable for a Large Rotation Angle[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2004, 29(12): 1 101-1 104(陈义,沈云中,刘大杰. 适用于大旋转角的三维基准转换的一种简便模型[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2004, 29(12): 1 101-1 104)
- [13] Kou Gang. RTK Positioning Technology and Its Application in Piling[D]. Shanghai: Tongji University, 2004(寇刚. RTK 技术及其在打桩定位中的应用[D]. 上海:同济大学, 2004)
- [14] Su Lei. Bridge Monitoring Method Based on 3D Laser Scanning[D]. Nanjing: Hehai University, 2011(苏磊. 基于三维激光扫描的桥梁监测方法研究[D]. 南京:河海大学, 2011)
- [15] Liu Shaotang, Pan Guorong. Sources of Errors and Deformation Analysis of Laser Scanning Based Tunnel Deformation Monitoring[J]. *Journal of Railways Engineering Society*, 2013, 5:69-74(刘绍堂,潘国荣. 基于激光扫描的隧道变形监测的误差来源及变形分析[J]. 铁道工程学报, 2013, 5:69-74)

A Tunnel Overall Deformation Monitoring Method and Its Application

LIU Shaotang¹ LIU Wenkai¹ ZHOU Yueyin²

¹ School of Civil Engineering, Henan Institute of Engineering, Zhengzhou 451191, China

² School of Surveying and Geoinformatics, Tongji University, Shanghai 200092, China

Abstract: In order to applied the three-dimensional laser scanning technology to tunnel deformation field, this paper proposed the overall tunnel deformation monitoring methods to replace the traditional single-point monitoring with engineering experimental research tools. Described the operation processes and pointed out what should pay attention to, discussed the point cloud registration and coordinates conversion problems. The study showed that the scanning stations distance can not exceed the diameter of the tunnel if ICP registration is taken, and set the reasonable scanning resolution to high resolution grade is appropriate. In order to avoid obstacles impact it is needed to scan on both sides of the tunnel centerline as scanning shielding rate is too large. The new method gives a fast, full access to get the complete deformation data of the tunnel surface and overcomes the shortcomings of the traditional methods.

Key words: tunnel deformation monitoring; 3D laser scanning; convergence monitoring; tunnel deformation analysis

First author: LIU Shaotang, professor, specializes in geomatics teaching and research. E-mail: lst707@163.com

Foundation support: The Key Scientific Research Program of Henan Province, No. 12210221042; the Scientific Research Program of Department of Education of Henan Province, No. 2010A420001.