

doi:10.3969/j.issn.1672-6073.2013.06.021

基于激光扫描技术的隧道变形分析方法

沙从术 刘绍堂

(河南工程学院土木工程学院 郑州 451191)

摘 要 为了对隧道的整体变形进行全面监测,采用理论结合实验研究的方法,基于三维激光扫描技术监测隧道变形,利用代数拟合、几何拟合和基于不变矩的椭圆拟合方法,均可对扫描断面拟合,两期拟合断面的差表示了隧道断面的变形,其应用效果良好。

关键词 城市轨道交通;隧道变形监测;三维激光扫描;椭圆拟合

中图分类号 U456.3 **文献标志码** A

文章编号 1672-6073(2013)06-0088-04

对于三维激光扫描仪的应用已经有很多研究成果,其在变形监测领域的应用使传统的单点数据采集方式得以改变,但在隧道变形监测中的应用还很有限。在有限的研究中,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,论述三维激光影像扫描技术在变形监测领域内应用的可行性、技术优势和存在的问题,并提出基于该技术的整体变形监测的初步设想。刘燕萍、程效军等^[2]基于三维激光扫描技术快速地采集盾构隧道的点云数据,并对其分割生成切片,提出用一种多点坐标平差计算圆心的方法求取切片圆心和半径,分析隧道的收敛变化。张蕴明、马全明等^[3]把三维激光扫描技术引入到地铁隧道收敛监测工作中,详细介绍其工作流程,并通过实测数据进行分析试验,阐述该方法的可行性。托雷、康志忠等^[4]提出了一种可应用于变形监测的隧道断面连续截取方法,该方法基于三维激光点云分为点云拼接、中轴线提取和断面截取。隧道中轴线的提取通过随机采样一致性算法和最小二乘平差算法完成;断面截取

过程先基于隧道轴线信息调整隧道姿态,再对隧道数据采取局部曲面拟合,其中引用了限制最小二乘算法和随机采样一致性算法。文献[5]提出了基于沉降观测方法的建筑沉降分析方法;Stiros 和 Kontogianni^[6]对收敛计测量的隧道断面进行椭圆拟合,给出了平均变形椭圆评估隧道收敛的应用。使用椭圆表达变形的一个主要好处是椭圆断面随时间的变化给出了隧道变形的二维向量^[7]。迄今为止变形椭圆仅限应用于有限监测点的断面变形的表达。下面用椭圆拟合断面、扫描断面及断面差,描述激光扫描观测的隧道整体变形情况。

1 断面拟合前的数据准备

为了分析整个隧道的收敛情况,须在隧道内用激光扫描仪连续扫描断面,扫描点云必须要进行数据预处理,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,扫描时必须要多站扫描,点云数据配准也必须进行;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;另外,为了便于对多次扫描进行比较,确保提取得到隧道同一位置的横断面,需要使用最优的配准算法来对齐两期扫描点云。由 Besl 首先提出并广泛使用的迭代最近点(ICP)算法^[8]主要用于解决基于自由形态曲面的配准问题,是点云匹配的数据驱动配准方法。迭代最近点(ICP)算法的目标是要扫描隧道模型形状(D)和原型模型形状(M)是否匹配。就激光扫描点云配准而言,第一期扫描点云(PC_1)作为原型模型,第二期云(PC_2)将被放在数据模型的位置。第一期点云任意点(P_{1i})到第二期点云的最近点(PC_2)的距离(d)用算法实现最小化:

$$d(p_{1i}, p_2) = \min_{p_2 \in P_2} \|p_2 - p_{1i}\|$$

第一期数据的每个点(PC_1)和距离其最近的第二期数据的对应点(PC_2)形成一个组合。ICP 算法最小二乘回归使两者之间的距离均方误差最小。

收稿日期: 2013-01-23 修回日期: 2013-09-30

作者简介:沙从术,男,副教授,主要从事测绘工程教学和研究工作, lst707@163.com

基金项目:河南省重点科技攻关计划项目(122102210421);河南省教育厅科技攻关计划项目(2010A420001)

2 激光扫描隧道的断面拟合

基于最小二乘的椭圆拟合方法适用于各种复杂的对象模型,并能直观地给出关于某种拟合误差的测度,达到很高的拟合精度^[9],分为代数椭圆拟合和几何椭圆拟合。

2.1 代数椭圆拟合法

代数椭圆拟合的基础是线性或非线性最小二乘回归,设椭圆的方程是:

$$ax^2 + bxy + cy^2 + dx + ey + f = 0 \quad (1)$$

式中, $b^2 - 4ac \leq 0$ 。

把数据集拟合为椭圆,椭圆的公式可以推广为

$$ax_i^2 + bx_iy_i + cy_i^2 + dx_i + ey_i + f = r_i \quad (2)$$

式中,欲拟合的扫描点集为 $(x_i, y_i, \dots, x_n, y_n)$, 其矩阵为

$$\begin{bmatrix} x_1^2 & x_1y_1 & y_1^2 & x_1 & y_1 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_i^2 & x_iy_i & y_i^2 & x_i & y_i & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_n^2 & x_ny_n & y_n^2 & x_n & y_n & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \\ d \\ e \\ f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_1 \\ \vdots \\ r_i \\ \vdots \\ r_n \end{bmatrix} \quad (3)$$

或者 $xu = r \quad (4)$

式中

$$u = \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \\ d \\ e \\ f \end{bmatrix}$$

为了得到最佳椭圆, r 必须最小化,即

$$\|xu\| = \min \quad (5)$$

总体而言,代数算法试图找到最佳的 u 值以使系列的点接近标准的椭圆方程,为使代数距离最小化则使用约束条件:

$$b^2 - 4ac = 1 \quad (6)$$

把约束条件统一为标准化因数,目前已被集成到用 Matlab 软件编写的激光扫描数据椭圆拟合代码中。Fitzgibbon 等^[10]研究证明,特定的非迭代椭圆算法处理含有噪声或有遮挡的数据优于其他代数拟合算法。

2.2 几何椭圆拟合

几何椭圆拟合的目标是任何一点到椭圆上对应点的欧氏距离最小(见图1)。

椭圆的参数方程是:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha \\ \sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \cos \varphi \\ b \sin \varphi \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中: x_0, y_0 为椭圆的中心; a 为椭圆长轴的长度; α 为椭圆长轴对 x 轴的倾角; b 为垂直于长轴 a 的短轴长度; φ 为扫描点的角参数,从主轴逆时针旋转,在 $0 \sim 2\pi$ 之间。

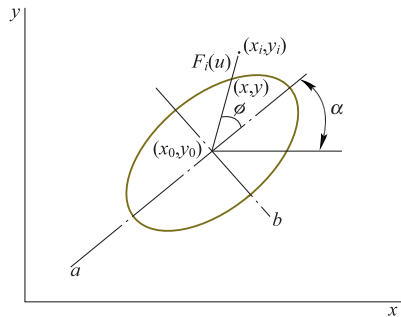


图1 几何椭圆拟合

通过以下参数定义椭圆:

$$u = \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ a \\ b \\ \varphi \end{bmatrix}$$

对于不在椭圆上的一组数据,那么可以用 $d_i(u)$ 来定义点 (x_i, y_i) 和椭圆中心点 (x_0, y_0) 之间的距离:

$$d_i(u) = \left\| \begin{bmatrix} x_i & x_0 \\ y_i & y_0 \end{bmatrix} \right\|$$

则在椭圆上其对应的点沿相同的方向到该椭圆中心的距离是:

$$\begin{aligned} c_i(u) &= \left\| \begin{bmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha \\ \sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \cos \varphi_i \\ b \sin \varphi_i \end{bmatrix} \right\| \\ &= \sqrt{(a^2 \cos^2 \varphi_i + b^2 \sin^2 \varphi_i)} \end{aligned} \quad (8)$$

因此,定义从第 i 个点到椭圆上点的距离为:

$$F_i(u) = \|d_i(u) - c_i(u)\|$$

椭圆拟合算法的目标是使 $F_i(u) = \|d_i(u) - c_i(u)\|$ 为最小,其中涉及求解非线性最小二乘问题。

为了最小化 $F_i(u)$,则该模型需要满足:

$$G(u) = \sum_{i=1}^m F_i^2(u) = \min \quad (9)$$

为求解这个方程, φ 必须为已知。根据 (x_i, y_i) 、椭圆上的点 (x, y) 和椭圆中心 (x_0, y_0) , 可以求得其连线的斜率 k , 由此很容易求出长轴的夹角 φ 。

$$k = \frac{y - y_0}{x - x_0} = \frac{y_0 - y_i}{x_0 - x_i}$$

很明显, (x_0, y_0) 必须在点云定义的区域范围内, 椭圆长轴的长度也不能超过最远端点坐标的连线。由于短轴或长轴都位于第一象限, 所以 α 的限制条件为 $(0, \frac{\pi}{2})$ 。

Ray 和 Srivastava^[11] 证明, 在仅能采集局部少量数据的情况下, 几何椭圆拟合法处理高噪声数据的能力更强。

2.3 基于不变矩的椭圆拟合

基于不变矩的椭圆拟合问题可表示为: 给出一个由有序点序列 $\{p_i = (x_i, y_i)\}_{i=1}^n$ 定义的断面 C , 确定一个最佳拟合椭圆, 即确定它的 5 个参数。

首先计算断面 C 的质心, 并把它作为椭圆的中心

$$\begin{cases} x_0 = \frac{m(1,0)}{m(0,0)} \\ y_0 = \frac{m(0,1)}{m(0,0)} \end{cases} \quad (10)$$

式中, $m(u, v) = \sum_{i=1}^n x_i^u y_i^v$, $m(u, v)$ 称作原点矩, 而中心距定义为

$$\bar{m}(u, v) = \sum_{i=1}^n (x_i - x_c)^u (y_i - y_c)^v \quad (11)$$

过断面 C 的质心做一条与 x 轴夹角为 φ 的直线, 则断面 C 相对于这条直线的惯性矩就定义为 C 上各点到该直线距离的平方之和, 即

$$\bar{m}_\varphi = \sum_{i=1}^n r_i^2 \sum_{j=1}^n [(y_i - y_0) \cos \varphi - (x_i - x_0) \sin \varphi]^2 \quad (12)$$

将式(11)代入式(12), 得

$$\bar{m}_\varphi = \bar{m}(0,2) \cos^2 \varphi + \bar{m}(2,0) \sin^2 \varphi - \bar{m}(1,1) \sin 2\varphi \quad (13)$$

使 \bar{m}_φ 具有最大和最小的 φ , 应该分别是拟合断面 C 的椭圆的长短轴方向, 由 $d\bar{m}_\varphi/d\varphi = 0$ 可求得

$$\varphi_{\text{mix}, \max} = \frac{1}{2} \text{actg} \frac{2\bar{m}(1,1)}{\bar{m}(2,0) - \bar{m}(0,2)} \pm \frac{n\pi}{2}, (n \text{ 为整数}) \quad (14)$$

而椭圆长轴的长度则由下面的公式近似估计为

$$a = \sqrt{\frac{1}{n} \bar{m}_\varphi | \varphi_{\max}}, b = \sqrt{\frac{1}{n} \bar{m}_\varphi | \varphi_{\min}} \quad (15)$$

3 隧道整体变形的表达方法

3.1 用拟合断面差表示径向变形

采用非迭代椭圆特定算法得到以原点为中心的拟

合椭圆, 为方便对比, 提取出定义椭圆的参数(两轴长度、椭圆中心位置、椭圆轴的倾斜角)。拟合椭圆的断面变形用分布式径向位移断面(DRDP)表示。

DRDP 的计算公式是:

$$\text{DRDP} = E_1 - (\Delta_{E_1 E_2}) \gamma \quad (16)$$

式中: E_1 为第一期激光扫描断面的最优拟合椭圆; E_2 第二期激光扫描断面的最优拟合椭圆; γ 为位移放大倍数; $\Delta_{E_1 E_2}$ 为第一期和第二期最优拟合椭圆之间的变化量, 正数表示第二次扫描隧道断面比第一次收敛。

用 DRDP 可以辨别断面上的收敛和扩张区域, 同时 DRDP 还是一个描述二激光扫描的断面变形趋势的向量。

椭圆拟合分析还可以生成一个径向位移断面(DDP)。计算公式是:

$$\text{DDP} = E_1 - (\Delta_{E_1 E_2}) \quad (17)$$

径向位移断面(DDP)可以评价隧道断面收敛和扩张的最大值。

3.2 用扫描断面差表示隧道变形

激光扫描断面分析就是直接使用激光扫描数据。激光扫描断面变形也用 DRDP 和 DDP 来计算、分别用 CS_1 、 CS_2 代替 E_1 、 E_2 。

其中: CS_1 表示第一次激光扫描断面; CS_2 表示第二次激光扫描断面。因此, DRDP 变成了

$$\text{DRDP} = CS_1 - (\Delta_{CS_1 CS_2}) \gamma \quad (18)$$

DDP 计算

$$\text{DDP} = CS_1 - (\Delta_{CS_1 CS_2}) \quad (19)$$

4 应用

根据以上原理, 利用 Matlab 编程对某隧道进行了激光扫描。从两期扫描数据提取的激光隧道断面(见图 2(a)和(b))使用椭圆拟合法对其进行最优拟合, 得到两个最优拟合椭圆(见图 2(c)和(d))。把拟合得到的两个最优拟合椭圆和激光扫描断面配准对齐(见图 2(e)), 进行分析后结果(见图 2(f))。同理, 也可对直接提取的断面进行分析(扫描断面)(见图 2(g))。

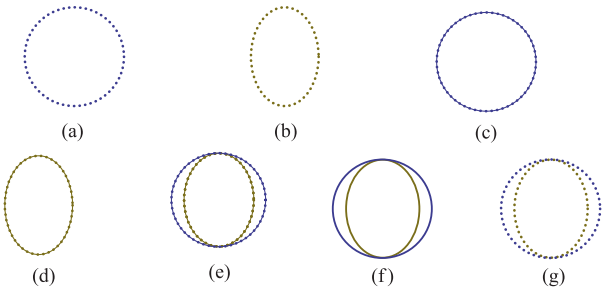


图2 应用实例

在应用中,为了分析该激光扫描数据的噪声,把激光扫描断面和椭圆拟合断面求差,即可生成噪声断面(NP)(见图3),噪声断面NP反映了椭圆断面的随机噪声、系统偏差和异常运动,有

$$NP_1 = DDP_{E_1} - DDP_{CS_1} \quad (20)$$

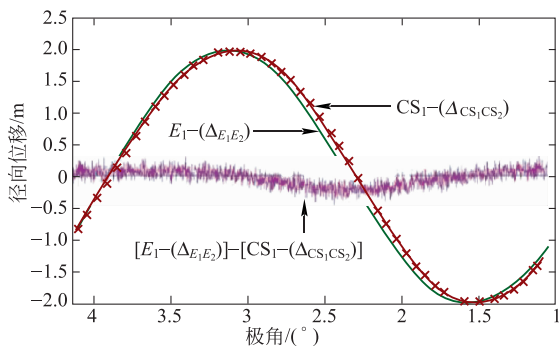


图3 用噪声断面表达隧道变形

此外,还可以用激光扫描隧道断面的面积变化表示变形(见图4)。

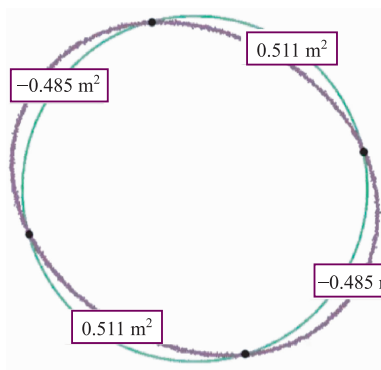


图4 用断面面积的变化表示的隧道变形

5 结论

对隧道外部的变形监测多是通过经纬仪、水准仪及全站仪对隧道断面的永久标记进行观测完成的。近年来还引入了全站仪自动监测系统,虽然观测精度可靠,但都是一次监测数量有限的目标或棱镜。激光扫描使隧道整体变形监测成为可能,无论采用代数拟合、几何拟合或是不变矩的椭圆拟合方法,均可以对扫描断面进行表达,通过不同时期相同位置的激光扫描断面或拟合断面求差,均能有效表达隧道断面的变形,应用证明效果良好。

参考文献

[1] 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] 刘燕萍,程效军,贾东峰.基于三维激光扫描的隧道收敛分析[J].工程勘察,2013(3):74-77.

[3] 张蕴明,马全明,李丞鹏,等.三维激光扫描技术在地铁隧道收敛监测中的应用[J].测绘通报,2012(S1):438-440.
[4] 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(2):171-175,185.
[5] 周聘之.基于沉降观测方法的建筑沉降分析与应用[J].吉首大学学报:自然科学版,2011(2):71-73.
[6] Stiros S, Kontogianni V. Mean deformation tensor and mean deformation ellipse of an excavated tunnel section[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2009,46(8):1306-1314.
[7] Delaloye D, Hutchinson J, Diederichs M. Application of elliptical fit algorithm for tunnel deformation monitoring with LiDAR[C]. TAC 2012 Tunnels and Underground Spaces: Sustainability and Innovations. Montreal, Canada, 2012.
[8] Besl P J, McKay N D. A method for registration of 3-D shapes[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1992, 14(2):239-256.
[9] 邹益民,汪渤.一种基于最小二乘的不完整椭圆拟合算法[J].仪器仪表学报,2006,27(7):808-812.
[10] Fitzgibbon A W, Pilu M, Fisher R B. 1996. Direct least squares fitting of ellipses[C]. In: The 13th International Conference on Pattern Recognition, Los Alamitos CA, USA. 1996.
[11] Ray A, Srivastava D C. Non-linear least squares ellipse fitting using the genetic algorithm with applications to strain analysis[J]. Journal of Structural Geology, 2008,30(12):1593-1602.

(编辑:郝京红)

Tunnel Deformation Monitoring Based on Laser Scanning

Sha Congshu Liu Shaotang

(School of Civil Engineering, Henan Institute of Engineering, Zhengzhou 451191)

Abstract: To comprehensively monitor the overall deformation of a tunnel, theoretical study combined with tests was carried out. Based on 3D laser scanning technology to monitor the tunnel deformation, elliptical fitting methods including algebraic fitting, geometric fitting and ellipse fitting based on moment invariants were adopted to fit the scanned cross-section. The difference between two fitting cross-sections indicates deformation of the tunnel cross-section with good results obtained.

Key words: urban rail transit; tunnel deformation monitoring; 3D laser scanning; elliptical fitting