

基于三维点云的隧道全局中线提取方法及应用*

程云建^{1,2†}, 仇文革^{1,2}, 雷劲^{1,2}

(1.西南交通大学 交通隧道工程教育部重点实验室,四川 成都 610031;

2.西南交通大学 土木工程学院,四川 成都 610031)

摘要:提取隧道横断面通常是基于隧道中线,而隧道中线提取是最困难的一个环节。本文提出了一种有效的隧道全局中线自动提取算法:通过从隧道的点云水平投影中提取边界点,并利用随机采样一致性算法提取边界点中用于多模型拟合的内点,最终的隧道中线基于再次随机采样的全局优化算法确定。所提出的算法被应用于位于四川的写字岩隧道,结果表明:全局中线提取达到了较高的精度,其均方根误差为 16.5 mm;与全站仪测量的隧道中线点相比,偏差的均方根误差为 10.3 mm。

关键词:隧道工程;中线提取;三维点云;随机采样一致性算法

中图分类号:U45

文献标志码:A

Application of Method for Global Extraction of Tunnel Centerlines Based on 3D Point Clouds

CHENG Yunjian^{1,2†}, QIU Wenge^{1,2}, LEI Jin^{1,2}

(1.Key Laboratory of Transportation Tunnel Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;

2.School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: Terrestrial laser scanning has been widely used in tunnel engineering, the extraction of tunnel cross sections is often based on tunnel centerlines, which is the most difficult part. A novel method for automated extraction of tunnel centerlines was presented in this paper. In this process, the boundary points of a tunnel are extracted from tunnel point clouds, the inliers for multiple model fitting are estimated from tunnel boundary points using RANSAC (RANDOM SAMPLE CONSENSUS) algorithm, the final centerlines are determined using a global optimization based on a re-sampled algorithm. The proposed method was applied in the Xieziyan tunnel in Sichuan. The results of application showed the extraction of tunnel centerlines achieved a high accuracy. The RSME of centerlines fitting was 16.5mm. Compared with total station surveying, the RMSE of the deviations was 10.3 mm.

Key words: tunnel engineering; extraction of centerlines; 3D point clouds; RANSAC algorithm

随着高铁隧道修建,隧道安全问题也越来越受到了隧道运营管理者们的关注,但是隧道内部通常处于无光的环境中,这势必对隧道测量带来诸多的困

难。三维激光扫描技术即使在无光的条件下也能提供高精度、高密度的快速测量^[1]。所以三维激光扫描仪在隧道检测和变形分析中的应用日益增多^[2-6]。

* 收稿日期:2016-06-15

基金项目:国家自然科学基金重点项目(U1434206), Key Program of National Natural Science Foundation of China(U1434206)

作者简介:程云建(1986—),男,辽宁葫芦岛人,西南交通大学博士研究生

† 通讯联系人, E-mail: by_sky@126.com

隧道中线对于从三维点云中提取隧道横断面十分重要,诸多基于三维激光扫描技术提取横断面的研究^[7-11]中都预先提取了隧道中线。目前的隧道中线提取算法主要基于两种策略,其中一种是基于2D投影:Han等^[7]将隧道的点云数据投影到二维平面上生成二值图像,通过提取图像的中线来估算隧道水平面中线,但是他们的算法中没有给出隧道中线的数学表达式;托雷等^[8]将三维点云数据分别投影到X-Y和Y-Z两个平面,通过二次曲线拟合来提取隧道中线,这种算法只能计算局部的隧道中线,难以拟合整条隧道的中线。另一种策略则是基于3D模型拟合:谢耀辉等^[9]通过用圆柱面拟合隧道点云子集,并把圆柱面的轴线作为隧道中线,但这种方法的隧道横断面形式被限制于圆形;李双^[10]对谢耀辉等^[9]的中线提取方法进行了改进,提出了基于三维不变矩阵的隧道中线的提取方法,但也只能提取隧道局部中线。胡佳琦^[11]用全站仪的架站点之间的连线作为隧道中线粗略提取断面,然后将所提取断面的形心的连线作为新的隧道中线。以上拟合存在共同的缺陷在于他们所提取的隧道中线均不与隧道线路设计标准相匹配,现行隧道线路设计标准^[12]是平面线形和纵断面坡度分别设计,其中隧道水平面中线应由一系列的直线、缓和曲线和圆曲线组成,将曲线段的隧道中线近似于其他线形,都将降低中线提取的精度,除非将隧道点云分割成较小的段,但当隧道长度较长时,这种做法的工作量十分庞大,并且无法连续提取隧道横断面。

本文将三维点云投影于X-Y平面(不考虑隧道坡的影响),然后基于边界提取、随机采样一致性和全局调整算法,提取了X-Y平面中隧道全局中线的数学表达式(也适用于提取隧道局部中线),并且没有横断面形式的限制,其提取过程几乎完全自动化(仅需要预先设定阈值),并将提取的全局中线结果与全站仪测量数据进行对比分析。

1 隧道中线提取方法

1.1 仅基于水平面中线提取横断面误差分析

图1为隧道点云在纵断面的投影, h_1 为基于与隧道坡度 i 方向垂直所提取的横断面高度, h_2 为仅基于水平面中线(即垂直方向)所提取的隧道横断面的高度, h_2 与 h_1 之间的偏差 Δh 如式(1)所示:

$$\Delta h = \sqrt{h_1^2 + (i \cdot h_1)^2} - h_1 \quad (1)$$

《公路隧道设计规范》^[13]指出隧道纵坡一般情

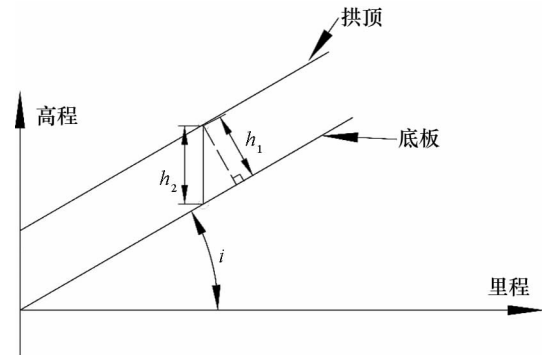


图1 两种不同方式所提取的横断面高度对比。

Fig.1 Comparison of cross-sectional height extracted using two different ways

况不应大于30%,建筑限界高度不应大于5m,文献^[14]中指出铁路隧道的设计坡度最大为25%,所以偏差 Δh 可以控制在3mm之内。目前的三维激光扫描仪均可做整平处理,且随着坡度和横断面高度的减小,偏差 Δh 也随之减小。Han等^[7]的研究也证明了仅基于隧道水平中线提取横断面是可靠的,因此基于隧道水平面中线提取隧道横断面完全能够满足隧道工程的误差容忍度。

1.2 隧道边界点提取

Truong-Hong等^[15]通过运用角准则提取楼房立面的边界点进行三维点云的体素化操作。改进其算法使其适用于隧道点云水平投影的边界点提取,具体方法如图2所示。

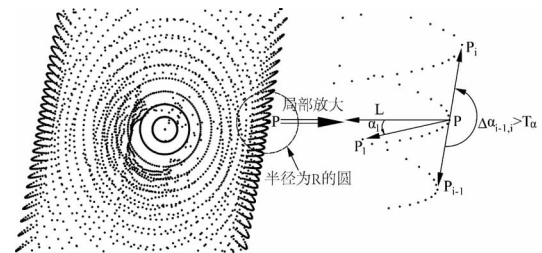


图2 隧道边界点提取

Fig.2 Extraction of tunnel boundary points

与图像边界特征提取相似^[16-17],采用二维提取策略,将点云数据投影于X-Y平面,点P为平面点云中的任意一点,点P的临近点定义为以点P为圆心R为半径的圆内的点,在以点P为极点的极坐标中,临近点的角坐标集合为 α ,集合 $\Delta\alpha$ 为连续角坐标之间的差值,如果点P为边界点,那么集合 $\Delta\alpha$ 中一定存在大于角阈值 T_α 的值,反之则点P为内部点。由于隧道的曲率半径比较大,其边界在小尺度范围内可近似于直线,所以角阈值 T_α 被确定在 $165^\circ \sim 175^\circ$ 之间。

1.3 初始内点集提取

隧道水平面中线是由一系列的直线,缓和曲线和圆曲线组成,它们的数学模型表达式如下所示:

直线模型:

$$y = ax + b \quad (2)$$

式中 a 和 b 为直线参数.

圆曲线模型:

$$(x - \alpha)^2 + (y - \beta)^2 = R^2 \quad (3)$$

式中 α , β 和 R 为圆曲线参数.

缓和曲线模型:

$$A^2 = RL_s \quad (4)$$

式中 A 和 L_s 为缓和曲线参数.

如图3所示,为了容纳缓和曲线,圆曲线通常向内偏移和向外偏移,其内移量 p 和外移量 q 的数学表达式^[18]为:

$$p = \frac{|\beta - a\Delta\alpha - b|}{\sqrt{1+a^2}} - R \approx \frac{L_s^2}{24R} - \frac{L_s^4}{2\ 688R^3} \quad (5)$$

$$q \approx \frac{L_s}{2} - \frac{L_s^3}{240R^2} \quad (6)$$

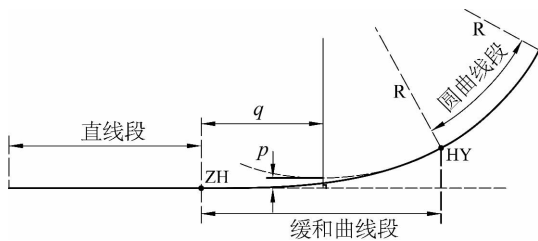


图3 隧道水平面中线分段

Fig.3 Segmentation in tunnel horizontal centerlines

所以如果已知直线和圆曲线的数学表达式,缓和曲线的参数可通过式(5)求得,而缓和曲线的起点可通过式(6)绝对定位于直缓点 ZH 上.

两条隧道边界线在直线段是平行的,在圆曲线段有相同的圆心,且边界线到隧道中线的距离相等,所以隧道边界线的数学表达式如下所示:

由式(2)得出两条直边界线的表达式为:

$$y = ax + b \pm c \quad (7)$$

式中 c 为直边界线的参数.

由式(3)得出两条圆曲线边界线的表达式为:

$$(x - \alpha)^2 + (y - \beta)^2 = (R \pm D)^2 \quad (8)$$

式中 D 为圆曲线边界线的参数.

为了获取用于拟合隧道中线所需的初始内点集合,即直线段和圆曲线段的初始内点集,式(7)和式(8)需要使用随机采样一致性算法^[19]估算参数.随机采样一致性算法是通过在全部数据集合中多次随机抽样,获取用于估算模型的最小数据集,在全部数据中依次校验最小数据集中的每一组数据,

误差最小的一组数据所获取的模型被认为是最优模型,同时设置阈值排除与该模型不符的点(外点).使用该算法获取直线段和圆曲线段初始内点集的具体步骤如下:

1)分别随机选取不在同一侧的3个和4个隧道边界点估算两条直边界和圆曲线边界的参数.

2)如图4,内点集可被定义为到已估算的边界线的距离小于阈值 T 的边界点.

3)将步骤1)和步骤2)经过足够次数的循环,步骤2)中内点数量最多的内点集即为所需的初始内点集.

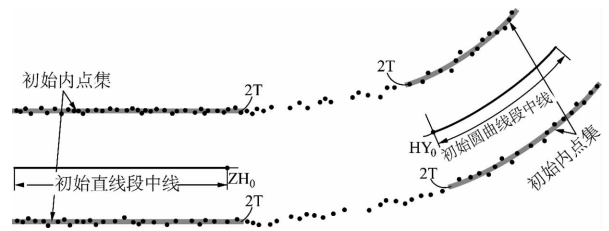


图4 基于随机采样一致性法提取初始内点集

Fig.4 Extraction of initial inlier sets based on RANSAC

1.4 基于再次随机采样的全局优化算法提取隧道中线

如图4所示,因为初始内点集中的内点是由误差阈值 T 获取,所以属于缓和曲线段的边界点可能被误归类到初始内点集中,这样会导致直线段和圆曲线段中的内点区间被延长.为了减少随机采样一致性算法所带来的误差,最终的隧道中线是基于再次随机采样的全局优化算法所确定的.分别在直线段和圆曲线段的初始内点集中进行再次随机采样,用所得的采样点重新估算直线边界和圆曲线边界,并根据所得的直线边界函数和圆曲线边界函数重新计算缓和曲线边界,则全局优化目标函数如式(9)所示;

$$\begin{cases} F_i = \Delta_i^T \Delta_i \\ \Delta_i = (\rho_{i,1}, \rho_{i,2}, \dots, \rho_{i,r})^T \end{cases} \quad (9)$$

式中 ρ_i 为从边界点到第 i 次采样所得的隧道边界的正交距离; r 为隧道边界点的总数量.

经过足够次数的随机采样后,则目标函数 F_i 中的最小值所对应的边界为最优边界,根据最优边界函数中的直线和圆曲线参数即可得到最优的隧道中线函数表达式.

2 案例应用与误差分析

2.1 试验数据获取

将所提出的中线提取算法应用于四川的写字

岩铁路隧道(隧道长 532 m),使用 Faro X130 三维激光扫描仪(单点测量精度为±2 mm)对隧道表面共进行了 22 次测站扫描,所获取的点云数据如图 5 所示,点云中数据点的总数为 9.18 亿。

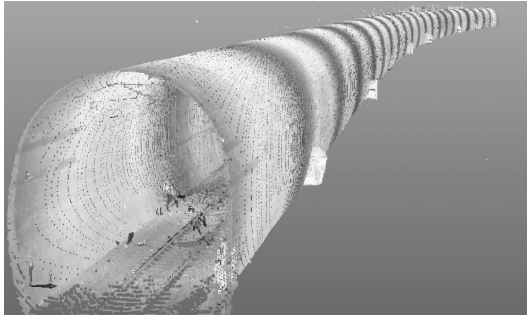


图 5 写字岩隧道点云数据

Fig.5 Point clouds of Xieziyan tunnel

2.2 隧道边界点提取

全局中线提取算法采用 matlab 编程实现,为了提高运算效率,将原始点云数据进行抽稀采样处理,采样点的总数为 0.09 亿,如图 6 所示,重采样点被投影于 X-Y 平面,运用文中的边界提取算法进行隧道边界点提取,所提取的隧道边界点如深色的点所示。在隧道边界外的点为避车洞点云,根据这些点云的高程特征,在边界提取过程中,可去除这些噪点。

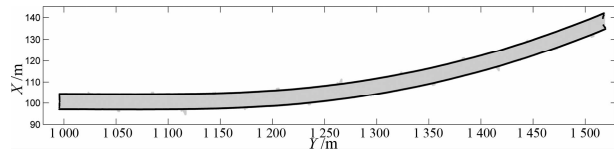


图 6 隧道边界点提出结果

Fig.6 Result of boundary points extraction

2.3 隧道全局中线提取

使用随机采样一致性算法从隧道边界点中提取直线段和圆曲线段的初始内点集的结果如图 7 所示,对两组初始内点集进行重新采样搜寻最优的中线参数,所得的隧道中线如图 7 所示,和初始内点集相比,隧道全局中线中的直线和圆曲线明显被缩短,这表明基于再次随机采样的全局优化算法剔除了缓和曲线边界的噪点,减少了首次随机采样一致性算法所带来的误差。

2.4 误差分析

作者采用所有边界点到隧道边界模型的正交距离的均方根误差(RMSE)作为评价标准。首次随机采样一致性算法所得的边界模型的均方根误差为 25.9 mm,经过再次随机采样全局优化,所得边

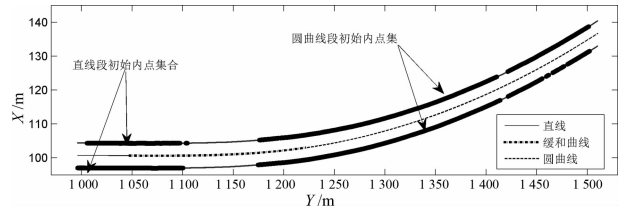


图 7 隧道全局中线提取

Fig.7 Global extraction of tunnel centerlines

界模型的均方根误差被减小到 16.5 mm,误差的产生主要是由于干燥的混凝土表面(未施作二次衬砌的隧道表面更为粗糙),线路施工偏差和仪器误差所造成的。

同时将中线提取结果与全站仪测量结果相比较,使用全站仪分别在直线、缓和曲线和圆曲线段进行两次隧道中线点测量,隧道中线点的测量方法为:测量同一里程同一水平面上隧道左右边墙上的点,并将两点连线水平投影的中点作为隧道中线点。全站仪所测的隧道中线点到所提取的隧道全局中线的正交距离如表 1 所示,其均方根误差为 10.3 mm。

表 1 自动全局提取中线与全站仪所测隧道中线点比较
Tab.1 Comparison between the centerline estimated by the proposed method and the centerline points measured with a total station

中线点编号	直线段		缓和曲线段		圆曲线段	
	1	2	1	2	1	2
正交距离	8.8	9.6	13.3	12.6	9.2	6.7
RMSE	10.3					

3 结论

1)完全基于隧道水平面中线提取横断面所产生的误差很小,完全能够满足实际工程需求。

2)关于算法,提出了自动提取隧道全局中线的总体流程。

3)文中所提出的中线提取算法满足现行隧道线路设计标准,并且提取隧道中线时无横断面形状的限制,提取过程几乎完全自动化。基于所提取的中线可以提取隧道任意位置的横断面。

4)案例应用及误差分析表明,本文所提出的隧道全局中线提取算法对施作了二次衬砌的隧道可以达到较高的精度,为从三维点云数据中提取隧道横断面奠定了基础。

参考文献

[1] 杨恣婧.地面三维激光扫描仪的测量误差分析[J].东华理工大

- 学学报:自然科学版,2013,36(2):228-232.
- YANG Minjing. The measurement error analysis of a terrestrial 3d laser scanner [J]. Journal of East China University of Technology : Natural Science, 2013, 36(2): 228-232. (In Chinese).
- [2] SEO D J, LEE J C, LEE Y D, *et al.* Development of cross section management system in tunnel using terrestrial laser scanning technique [J]. ISPRS-The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2008, 36(B5): 573-582.
- [3] HAN J Y, GUO J, JIANG Y S. Monitoring tunnel profile by means of multi-epoch dispersed 3D LIDAR point clouds [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2013, 33(1): 186-192.
- [4] LI J, WAN Y, GAO X. A new approach for subway tunnel deformation monitoring: high-resolution terrestrial laser scanning [J]. ISPRS-International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2012, 39(B5): 223-228.
- [5] STIROS S, KONTOGIANNI V. Mean deformation tensor and mean deformation ellipse of an excavated tunnel section [J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2009, 46(8): 1306-1314.
- [6] 闻永俊. 三维激光扫描技术在地铁盾构隧道变形监测中的应用研究 [D]. 徐州: 江苏师范大学测绘学院, 2013: 11-13.
- WEN Yongjun. The application research of 3D laser scanning technology in shield tunnel deformation monitoring [D]. Xuzhou: School of Geodesy and Geomatics, Jiangsu Normal University, 2013: 11-13. (In Chinese).
- [7] HAN S, CHO H, KIM S, *et al.* Automated and efficient method for extraction of tunnel cross sections using terrestrial laser scanned data [J]. Journal of Computing in Civil Engineering, 2013, 27(3): 274-281.
- [8] 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, 38(2): 171-175.
- TUO Lei, KANG Zhizhong, XIE Yuancheng, *et al.* Continuously vertical section abstraction for deformation monitoring of subway tunnel based on terrestrial point clouds [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2013, 38(2): 171-175. (In Chinese).
- [9] 谢雄耀, 卢晓智, 田海洋, 等. 基于地面三维激光扫描技术的隧道全断面变形测量方法 [J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(11): 2214-2224.
- XIE Xiongyao, LU Xiaozhi, TIAN Haiyang, *et al.* Development of a modeling method for monitoring tunnel deformation based on terrestrial 3D laser scanning [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(11): 2214-2224. (In Chinese).
- [10] 李双. 基于三维激光扫描技术的隧道连续断面提取及变形分析 [D]. 西安: 长安大学信息工程学院, 2015: 13-16.
- LI Shuang. Tunnel continuous cross-section extraction and deformation analysis using terrestrial scanning [D]. Xi'an: School of Information Engineering, Chang'an University, 2015: 13-16. (In Chinese).
- [11] 胡琦佳. 三维激光扫描技术在隧道工程监测中的应用研究 [D]. 成都: 西南交通大学地球科学与环境工程学院, 2013: 14-15.
- HU Qijia. Research on the application of 3D laser scanning technology in the tunnel deformation monitoring [D]. Chengdu: Faculty of Geosciences and Environmental Engineering, Southwest Jiaotong University, 2013: 14-15. (In Chinese).
- [12] GB/50090-2006 铁路线路设计规范 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2006: 7-21.
- GB/50090-2006 Code for design of rail line [S]. Beijing: China Planning Press, 2006: 7-21. (In Chinese).
- [13] JTG D70/2-2014 公路隧道设计规范 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2014: 16.
- JTG D70/2-2014 Code for design of road tunnel [S]. Beijing: China Communications Press, 2014: 16. (In Chinese).
- [14] 易思蓉, 聂良涛, 陈彦恒. 电气化铁路隧道最大坡度系数研究 [J]. 中国铁道科学, 2013, 34(6): 42-48.
- YI Sirong, NIE Liangtao, CHEN Yanheng. Research on the maximum gradient coefficient of electrified railway tunnel [J]. China Railway Science, 2013, 34(6): 42-48. (In Chinese).
- [15] TRUONG-HONG L, LAEFER D F, HINKS T, *et al.* Flying voxel method with delaunay triangulation criterion for facade/feature detection for computation [J]. Journal of Computing in Civil Engineering, 2012, 26(6): 691-707.
- [16] 王建华, 秦其明, 高中灵, 等. 加入空间纹理信息的遥感图像道路提取 [J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2016, 43(4): 153-156.
- WANG Jianhua, QIN Qiming, GAO Zhongling, *et al.* Road extraction from high-resolution remote sensing imagery by including spatial texture feature [J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2016, 43(4): 153-156. (In Chinese).
- [17] 姚建刚, 付鹏, 李唐兵, 等. 基于红外图像的绝缘子串自动提取和状态识别 [J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2015, 42(2): 74-80.
- YAO Jiangang, FU Peng, LI Tangbing, *et al.* Algorithm research of automatically extracting the area of insulator from infrared image and state identification [J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2015, 42(2): 74-80. (In Chinese).
- [18] 石伦侠. 利用拉格朗日展开公式求缓和曲线各元素的公式 [J]. 铁道科学与工程学报, 1984(2): 13-31.
- SHI Lunxia. Formulas for elements of transition curve by Lagrange's expansion theorem [J]. Journal of Changsha Railway University, 1984(2): 13-31. (In Chinese).
- [19] FISCHLER M A, BOLLES R C. Random sample consensus: A paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography [J]. Communications of the ACM, 1981, 24(6): 381-395.