

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2020.01.011

基于盾构隧道环缝点云的中轴线提取方法

陈 林,葛坤龙,王 涛

(苏州工业园区测绘地理信息有限公司,江苏 苏州 215000)

摘要: 为了降低盾构隧道中轴线提取对原始点云预处理的要求,引入了点云特征提取方法。首先,以基于距离差特征的裂缝点云提取方法,识别盾构隧道管片拼接处的环缝点云;然后,以最小二乘法对提取的环缝内散点进行环缝曲线拟合;最后,在环缝曲线的基础上提取隧道中轴线。实验结果表明:基于距离差特征点云提取方法能够有效识别环缝点云,并在环缝点云的基础上拟合得到隧道中轴线。与传统提取方法相比,该方法更加快捷,且提取的中轴线更具有空间感。

关键词: 地面 LiDAR;盾构隧道;点云;中轴线;特征提取;最小二乘法

中图分类号:TU122 文献标志码:A 文章编号:1000-1980(2020)01-0073-06

Central axis extraction method of shield tunnel based on ring seam point cloud

CHEN Lin, GE Kunlong, WANG Tao

(Suzhou Industrial Park Surveying, Mapping and Geoinformation Co., Ltd., Suzhou 215000, China)

Abstract: In order to reduce the requirement of original point cloud preparation for the axis extraction of shield tunnel, a feature extraction method of point cloud is introduced in this study. Firstly, the ring joint point cloud of shield tunnel segment was identified based on the extraction method of crack point cloud with the distance difference feature. Then, the curve fitting of the interstitial points was carried out by the least square method. At last, the central axis of the tunnel is extracted on the basis of the circular seam curve. Experimental results show that the point cloud extraction method based on the distance difference feature can effectively identify the ring seam point cloud, and fit the tunnel central axis on the basis of the ring seam point cloud. Compared with the traditional extraction method, the proposed method is faster, and the extracted central axis is more spatial.

Key words: terrestrial LiDAR; shield tunnel; point cloud; central axis; feature extraction; least squares

传统基于点云的隧道断面变形监测方法通常首先是要提取隧道的中轴线,即隧道断面中心的连线,并以此为基准分析隧道连续断面的收敛及沉降,因此中轴线的提取方法和精度对后续的变形分析至关重要^[1-2]。国内外学者对此已进行了一定的研究:2013 年,托雷等^[3]利用 RNASAC 算法拟合了地铁隧道中轴线并实现隧道断面的截取与曲线拟合;2014 年,Fekete 等^[4]提出基于圆柱面拟合的隧道中轴线提取方法;2015 年,李双^[5]提出了基于三维不变矩的局部隧道中轴线提取方法。上述方法在三维空间内实现较为繁琐,尤其是针对运营期的隧道,大量管线设备安装在隧道壁上,导致需要进行大量的点云预处理工作。

盾构隧道拥有独特的结构形式,图 1 为盾构隧道管片安装结构展

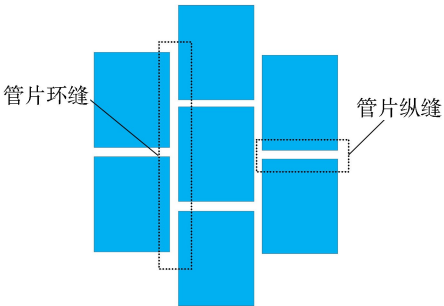


图 1 盾构隧道管片安装结构展开示意图
Fig. 1 Spreading map of shield tunnel installation structures

作者简介: 陈林(1993—),男,硕士研究生,主要从事精密工程测量研究。E-mail:544911005@qq.com
引用本文: 陈林,葛坤龙,王涛. 基于盾构隧道环缝点云的中轴线提取方法[J]. 河海大学学报(自然科学版),2020,48(1):73-78.
CHEN Lin, GE Kunlong, WANG Tao. Central axis extraction method of shield tunnel based on ring seam point cloud[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2020, 48(1): 73-78.

开图。其中,管片左右间空隙为环缝,上下间空隙为纵缝,拼接空隙可以看做是隧道中的“合理裂缝”^[6-7]。随着地面 LiDAR(激光雷达)技术和图像处理技术的发展,非接触、高精度的三维裂缝检测与分析成为可能,而且相比于隧道混凝土表面的细小裂缝而言,管片拼接空隙更容易被激光识别^[8]。本文以地面 LiDAR 技术获取的盾构隧道点云数据为对象,顾及盾构隧道预制管片拼接的特点,引入裂缝识别与提取方法^[9-10],以隧道管片拼接环缝为边界对点云数据分块,通过拟合边界曲线来间接提取隧道中轴线。

1 基于距离差特征的管片拼接环缝点云分析

图2为隧道管片环缝处点云的剖面示意图。可以看出, A_1 、 A_2 、 A_7 和 A_8 这4个点处在隧道面上,而 A_3 、 A_4 、 A_5 和 A_6 这4个点偏离了隧道面,且与隧道面的距离值大致呈凸状,被视作裂缝内的离散点^[11]。

根据上述基于距离差的裂缝结构描述,对裂缝的属性变化和变化规律进行分析。从左至右,假设各离散点到隧道面的距离为 $D(A_i)_{i=1,2,\dots,8}$ 。其中, A_1 点和 A_2 点同处在隧道面上,理论上到隧道面的距离相等,但由于地面 LiDAR 测距误差的存在, $D(A_1)$ 和 $D(A_2)$ 之间会存在一个差值 α_2 ,如式(1)所示。由于这个差值的存在导致基于距离差特征的环缝需要确定一个阈值。

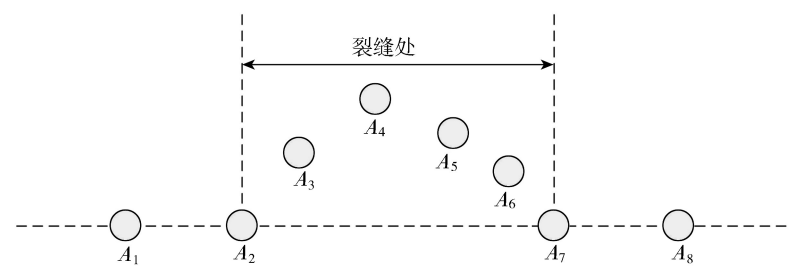


图2 基于距离差的裂缝结构描述

Fig.2 Description of fracture structure based on the distance difference feature

$$|D(A_2) - D(A_1)| = |\alpha_2| \tag{1}$$

从左至右依次将离散点到隧道面的距离为 $D(A_i)_{i=1,2,\dots,8}$ 与 $D(A_1)$ 作差:

$$|D(A_i) - D(A_1)| = |\alpha_i| \tag{2}$$

由图2可以看出,环缝内各离散点到隧道面的距离与 A_1 点到隧道面距离的差值 $|\alpha_3|$ 、 $|\alpha_4|$ 、 $|\alpha_5|$ 和 $|\alpha_6|$ 明显大于 $|\alpha_2|$ 。若能找到一个阈值 $\delta(\delta \geq 0)$,对由误差产生的距离差和环缝点与隧道面上点的距离差加以区分,即可实现对环缝点的提取。

从上述关于距离差特征的隧道环缝点云分析可知,若在隧道面上确定一点,并求出该点到隧道面的距离 D ,自该点沿某一方向遍历点云,当某个离散点到隧道面的距离 D_i 与 D 的差值超过阈值 δ 时,表明该点的前一个点为环缝起点,随着点云在该方向上的前进,后续的离散点到墙面的距离与 D 的差值会慢慢增大,到达一个最大点后再慢慢减小直至小于阈值 δ ,表明裂缝结束,由此可提取出完整的环缝处点云。

2 盾构隧道点云中轴线提取

由第1节中基于距离差的环缝特征分析可知,各离散点到隧道面距离的差值是判断该点是否为裂缝点的重要依据。因此,首先需要通过点云来拟合隧道面的方程,再通过点到平面的距离公式来提取裂缝点。但是由于隧道面是一个圆柱面,拟合方程较为复杂,因此考虑以单测站上同一高度(即 Z 坐标值相同)点云拟合曲线方程,并通过各点到曲线的距离来识别裂缝点。

2.1 同一高度点云选取

地铁隧道形变监测工作很大一部分是处在地铁运营期。图3为运营隧道点云图,由于各种管线设备的阻挡,难以获得完整的隧道内壁点云图,使得点云图上存在很多空洞;另一方面,隧道管片上存在很多孔洞,导致隧道内壁不够平滑。基于这两方面,若直接对隧道进行同一高度点云提取必然存在很大的问题。因此,需要先在点云可视化软件中选取隧道点云平滑无孔洞并完整的区域,再展开提取工作。

地面 LiDAR 系统激光照射在目标物上形成的光斑虽然微小,但还是存在一定的半径,若指定 Z 坐标初始值 z_{0i} (i 表示选定的第 i 个初始值)对离散点云进行索引,则提取出的点云数量会很少。因此考虑以

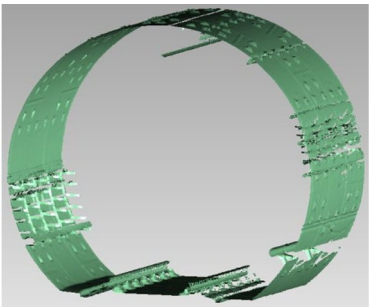


图3 盾构隧道点云图

Fig.3 Point cloud of shield tunnel

垂直方向的扫描间隔 Δt 为阈值,索引区间 $[z_{0i}-\Delta t, z_{0i}+\Delta t]$ 内的所有点。

2.2 基于最小二乘法的线性拟合

从 2.1 节中关于激光光斑的阐述可知,选取隧道点云同一高度上的一系列离散点应当是分布在某一曲线的两侧,因此无法直接确定曲线方程,需要通过拟合来进行求解。

参考隧道扫描坐标系的建立并结合实际可知,由于 Z 坐标近似,因此只需要在 XOY 面进行线性方程拟合^[12-13]。假设拟合的线性方程为

$$y = kx + c \tag{3}$$

式中: k, c ——待定参数。假设提取了 n 个点,用 (x_i, y_i) 表示,用 $\hat{k}$ 和 $\hat{c}$ 表示线性方程的拟合回归值。

根据最小二乘法原理,有 $\min \sum (\hat{k}x_i + \hat{c} - y_i)^2$, 由多元函数求极值的必要条件,有

$$\frac{\partial (\sum_{i=1}^n (\hat{k}x_i + \hat{c} - y_i)^2)}{\partial \hat{k} \partial \hat{c}} = 0 \tag{4}$$

组成法方程,有

$$\begin{bmatrix} n & \sum_{i=1}^n x_i \\ \sum_{i=1}^n x_i & \sum_{i=1}^n x_i^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{c} \\ \hat{k} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n y_i \\ \sum_{i=1}^n x_i y_i \end{bmatrix} \tag{5}$$

根据式(5),可求得待定参数的回归值 $\hat{c}$ 和 $\hat{k}$ 。

2.3 管片环缝点判别

2.2 节中已求得隧道直线部分的线性拟合方程 $y = \hat{k}x + \hat{c}$,根据点到直线的距离公式有

$$\Delta d_i^z = \frac{|\hat{k}x_i - y_i + \hat{c}|}{\sqrt{\hat{k}^2 + 1}} \tag{6}$$

式中: (x_i, y_i) ——2.1 节中提取的隧道直线部分的离散点坐标; Δd_i^z ——各离散点 (x_i, y_i) 到线性方程 $y = \hat{k}x + \hat{c}$ 的距离。

结合第 1 节中基于距离差特征的环缝点云分析,对各离散点到直线(即隧道面)的距离差值进行比较,识别出裂缝处点云。

2.4 基于最小二乘法的环缝断面圆曲线拟合

测站隧道扫描坐标系下,管片环缝断面与隧道中轴线垂直,即 Y 坐标一致,因此只需要考虑 XOZ 平面内圆曲线的拟合。盾构隧道的弯曲部分通常呈圆弧状,因此用圆曲线方程来拟合^[14-15]。本文利用基于圆半径距离差的最小二乘法来对圆曲线进行拟合,同样是在 XOY 平面内进行。

设隧道管片纵缝处断面的圆曲线方程为

$$(x - a)^2 + (y - b)^2 = R^2 \tag{7}$$

式中: (a, b) ——圆心坐标; R ——圆半径。

依据间接平差测边网函数模型,设圆心坐标平差值为 $(\hat{a}, \hat{b})$,半径的平差值为 $\hat{R}$,提取的管片纵缝点个数为 n ,用 (x_i, z_i) 表示,其到圆心的几何距离与拟合后圆方程的半径之间的差值为 d_i ,则有

$$d_i^2 = [\sqrt{(x_i - a)^2 + (y_i - b)^2} - R]^2 \tag{8}$$

依据最小二乘准则则有 $\min(\sum d_i^2)$ 。若将 d_i 作为观测值,则 $\hat{d}_i$ 的平差方程为

$$\hat{d}_i = d_i + v_i = \sqrt{(x_i - \hat{a})^2 + (y_i - \hat{b})^2} - \hat{R} \tag{9}$$

将式(9)按 Tylor 公式展开,得

$$v_i = -\frac{\Delta x_i^0}{s_i^0} \delta a - \frac{\Delta z_i^0}{s_i^0} \delta b - \delta R - l_i \tag{10}$$

若将式(10)用矩阵的形式表达,即

$$v = B\hat{x} - l \tag{11}$$

根据间接平差原理可知:

$$\hat{x} = (B^T P B)^{-1} B^T P l$$

(12)

式中: P ——权阵,由于离散点云相互独立且精度相当,故 P 为单位阵,即 $P=I$,所以可将式(12)简化为

$$\hat{x} = (B^T B)^{-1} B^T l$$

(13)

拟合出来的圆曲线即为隧道环缝断面的位置所在。

2.5 基于管片环缝断面的隧道中轴线提取

提取中轴线的意义在于可以确定隧道点云的空间姿态。同时,对于圆柱面外观的盾构隧道而言,中轴线相当于圆柱的轴线,轴线确定后,圆柱的半径就不难求出,这会为后续的隧道收敛形变分析提供很大的便捷。在拟合出环缝断面曲线的基础上进行中轴线提取,具体步骤如下:(a)根据中间环片两侧环缝断面曲线方程及其在 Y 轴上对应的位置范围,提取出中间环片的点云,实现环片分离。(b)环片分离后,单环片两侧圆曲线圆心位置的连线即为隧道的中轴线。

3 实验与分析

由于单测站获取的点云数量较大,因此只截取其中部分点云作为研究对象。图4为截取出来的原始点云,点云中包含3个完整的隧道环片,以此为对象研究中间环片两侧环缝的提取。

3.1 隧道断面环缝提取实验

根据2.1节在点云可视化软件上寻找平滑无孔洞区域共计6块。图5(a)为利用其中一块区域根据2.2节拟合出来的直线方程,选取初值 $z_{01}=2.3223\text{ m}$,按阈值垂直扫描间隔 $\Delta t=0.5\text{ mm}$,在索引区间内共提取出437个点,考虑到显示问题,仅随机选取了其中1/20点加以显示。图5(b)为以点到直线的距离为 Y 轴、各离散点 Y 坐标为 X 轴绘制的437个离散点的变化折线,可以明显看出2个环缝所在的位置。

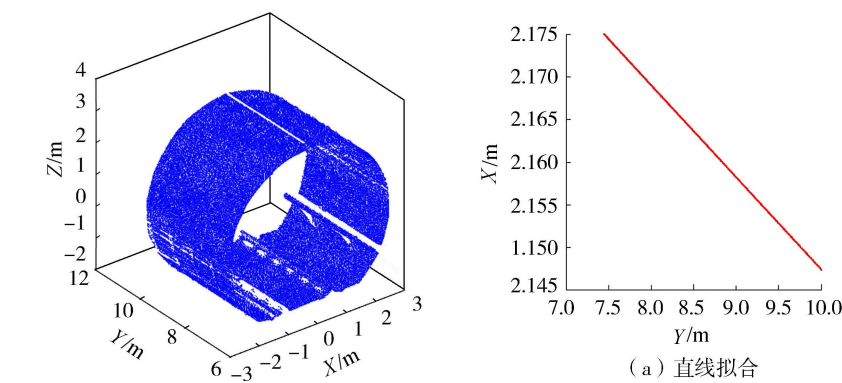


图4 原始点云

Fig.4 Original point cloud

图5 拟合效果

Fig.5 Effect of linear fitting

图6是根据2.4节拟合出来的中间环片两侧环缝的圆曲线。其中,图6(a)为中间环片左侧环缝圆曲线,圆心坐标为(0.065 9, 0.524 1),半径为2.763 3 m, Y 轴上的坐标为7.673 4 m;图6(b)为中间环片右侧环缝圆曲线,圆心坐标为(0.065 9, 0.524 3),半径为2.763 3 m, Y 轴上的坐标为8.892 1 m。

3.2 中轴线提取实验

如图7(a)所示,红色曲线为根据环缝拟合出来的圆曲线,按图中红色曲线位置将原始点云切开即可实现单环片分离。如图7(b)所示,黑色圆为两侧圆曲线的圆心所在位置,红色直线即为中轴线。

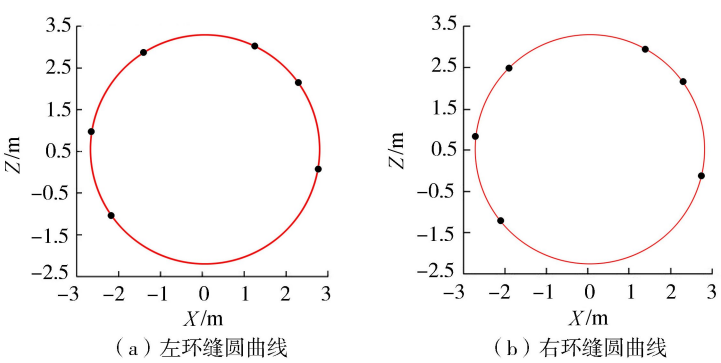


图6 曲线拟合效果

Fig.6 Effect of curve fitting

由3.1节与3.2节的盾构隧道环缝及中轴线提取实验可知,基于特征点云提取的方法,依靠点云可视化

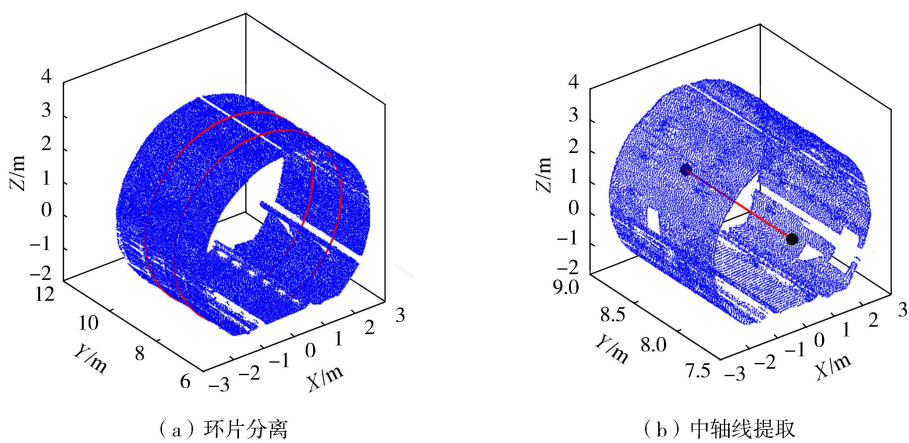


图 7 隧道单环片中轴线提取效果

Fig.7 Central axis extraction of tunnel ring

软件的辅助,有效减少了点云预处理的工作量,而传统的三维不变矩法^[2]以及圆柱面拟合法^[3]受限于隧道内部类似管线点云等噪声对中轴线提取精度的影响。同时,该方法直接应用于三维空间内的隧道点云,相较于投影拟合法^[1]提取的隧道中轴线更具有空间意义。

4 结 语

在总结现有基于点云的隧道中轴线提取方法的基础上,从点云特征提取方面入手,研究了基于特征点云提取的盾构隧道环片分离与中轴线提取方法。该方法以环缝位置为参考,将隧道整体点云局部化,有效避免了隧道整体点云分析存在的数据量大、不易处理以及点云情况多样等问题,同时对环片分别进行分析,使得后续的隧道形变提取更易进行。

盾构隧道存在曲线部分,本文使用的方法仅适用于直线部分。考虑到盾构隧道弯曲部分在施工过程中参照的曲线方程不一致,因此无法以统一的曲线方程进行环缝点识别,因此今后还需进一步对隧道曲线位置环缝点的识别与提取进行研究。此外,盾构隧道环缝本身也存在着错位等复杂情况,本文基于距离差的环缝提取方法适用于较为理想的情况,因此提出一种能够识别各种情况裂缝的方法也是后续研究的方向和难点。

参考文献:

[1] 荆海峰, 李广云, 王力, 等. 基于圆柱多段拟合的隧道中轴线提取方法研究[J]. 大地测量与地球动力学, 2018, 38(2): 211-216. (JIN Haifeng, LI Guangyun, WANG Li, et al. Research on extracting central axis of tunnel based on multi-segment cylinder fitting[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2018, 38(2): 211-216. (in Chinese))

[2] 程效军, 贾东峰, 刘燕萍, 等. 基于中轴线的隧道点云去噪算法[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2015, 43(8): 1239-1245. (CHENG Xiaojun, JIA Dongfeng, LIU Yanping, et al. Tunnel point cloud denoising algorithm based on centerline[J]. Journal of Tongji University(Natural Science), 2015, 43(8): 1239-1245. (in Chinese))

[3] 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))

[4] FEKETE S, DIEDERHIS M. Integration of three-dimensional laser scanning with discontinuum modelling for stability analysis of tunnels in blocky rockmasses[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2013, 57: 11-23.

[5] 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, 2015.

[6] 朱洪高, 郑宜枫, 杨滨. 双圆盾构(DOT)隧道的地表沉降分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2007, 35(2): 191-196. (ZHU Honggao, ZHENG Yifeng, YANG Bin. Analysis of surface settlement induced by DOT shield tunnel[J]. Journal of Hohai University(Natural Science), 2007, 35(2): 191-196. (in Chinese))

[7] 沈培良, 张海波, 殷宗泽. 上海地区地铁隧道盾构施工地面沉降分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2003, 31(5): 556-559. (SHEN Peiliang, ZHANG Haibo, YIN Zongze. Ground settlement due to shield construction in Shanghai metro Tunnel Project[J]. Journal of Hohai University(Natural Science), 2003, 31(5): 556-559. (in Chinese))

[8] 高波, 吴挺, 彭红霞, 等. 盾构隧道管片拼装纵缝变形规律研究[J]. 现代隧道技术, 2014, 51(5):145-149. (GAO Bo, WU Ting, PENG Hongxia, et al. On the deformation law of longitudinal joints of shield tunnel segment rings[J]. Modern Tunneling Technology, 2014, 51(5):145-149. (in Chinese))

[9] BUCKSCH A, KHOSHELHAM K. Localized registration of point clouds of botanic trees [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2013, 10(3): 631-635.

[10] 王果, 刘绍堂, 蒋瑞波, 等. 基于激光点云的建筑裂缝提取方法研究[J]. 激光与红外, 2017, 47(7): 896-899. (WANG Guo, LIU Shaotang, JIANG Ruiibo, et al. Research on building crack extraction method based on laser point cloud[J]. Laser & Infrared, 2017, 47(7): 896-899. (in Chinese))

[11] 敖建锋, 周鸣, 徐亚楠, 等. 基于点云数据的矿区路面裂缝提取技术[J]. 金属矿山, 2013, 42(6): 158-160. (AO Jianfeng, ZHOU Ming, XU Yanan, et al. Extraction of pavement cracks in mining area based on point cloud data[J]. Metal Mine, 2013, 42(6): 158-160. (in Chinese))

[12] 王继刚, 周立, 蒋廷臣, 等. 一种简单的加权整体最小二乘直线拟合方法[J]. 测绘通报, 2014(4): 33-35. (WANG Jigang, ZHOU Li, JIANG Tingchen, et al. A simple linear fitting method based on weighted total least square[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2014(4):33-35. (in Chinese))

[13] 刘凡, 赵风军, 邓云凯, 等. 一种基于最小二乘直线拟合的高分辨率 DBS 成像算法[J]. 电子与信息学报, 2011, 33(4):787-791. (LIU Fan, ZHAO Fengjun, DENG Yunkai, et al. A new high resolution dbs imagine algorithm based on least squares linear fitting[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2011, 33(4):787-791. (in Chinese))

[14] 陈明晶, 方源敏, 陈杰. 最小二乘法 and 迭代法圆曲线拟合[J]. 测绘科学, 2016, 41(1): 194-197. (CHEN Mingjing, FANG Yuanmin, CHEN Jie. Fiting of circular curve based on least square method and iterative method [J]. Science of Surveying and Mapping, 2016, 41(1): 194-197. (in Chinese))

[15] 丁克良, 刘全利, 陈翔. 正交距离圆曲线拟合方法[J]. 测绘科学, 2008(增刊1): 72-75. (DING Keliang, LIU Quanli, CHEN Xiang. Fitting of circles based on orthogonal distance[J]. Science of Surveying and Mapping, 2008(Sup1): 72-75. (in Chinese))

(收稿日期:2018 - 10 - 07 编辑:高建群)

• 简讯 •

河海大学举办第三届“博论天下”全国研究生水科学论坛

2019 年 12 月 15 日,第三届“博论天下”全国研究生水科学论坛在河海大学举办。

本届水科学论坛以“凝聚青年创新力量,助力新时代水利发展”为主题,设置了 6 个分论坛:水文水资源,水利水电,港口海岸及近海工程,土木与材料,农业资源与环境,水管理、水经济与水法学。

本届水科学论坛为全国水科学专业研究生搭建了深层次、宽领域、多角度的学术交流平台,展现了当前水科学领域的研究进展,促进了跨院校、跨专业的学术交流,为破解水资源、水生态、水环境、水灾害“四水问题”提供了青年智慧。

(本刊编辑部供稿)