

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2018.05.012

点云格网化滤波方法及其在隧道变形监测中的应用

王 涛¹,田林亚¹,侯建梅¹,赵 旭²,张 洋³

(1. 河海大学地球科学与工程学院,江苏 南京 211100; 2. 中设设计集团股份有限公司,江苏 南京 210014;
3. 苏州地质工程勘察院,江苏 苏州 215129)

摘要: 将三维激光扫描技术应用于地铁隧道变形监测,针对点云数据的预处理问题,研究基于小波分析的点云格网化滤波方法。结合南京地铁隧道扫描点云数据及其特性,分析和选择合理的插值方法对隧道点云进行格网化处理,采用小波变换对格网点数据进行异常值探测,采用小波阈值去噪对格网点数据进行整体去噪,获得滤波后的点云并进行封装对比,获得了很好的滤波效果。
关键词: 地铁隧道;点云格网化;点云滤波;克里金插值;小波分析
中图分类号: U452.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2018)05-0451-07

Method of the point clouds filtering by grid handling and its application in the deformation monitoring of tunnel

WANG Tao¹, TIAN Linya¹, HOU Jianmei¹, ZHAO Xu², ZHANG Yang³
(1. School of Earth Science and Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China;
2. China Design Group Co., Ltd., Nanjing 210014, China;
3. Suzhou Geological Engineering Investigation Institute, Suzhou 215129, China)

Abstract: The 3D laser scanning technology was applied to the deformation monitoring of subway tunnel, and for the pre-processing problem of point cloud data, a method of the point clouds filtering with grid handling was studied based on the wavelet analysis. Combining with the scanned point cloud data and its characteristics of Nanjing subway tunnel, this paper analyzed and selected a rational interpolation method to implement the grid processing of the cloud point data. The wavelet transform was used to detect the abnormal values of grid data, and the whole grid data was processed with the threshold de-noising method of wavelet. At last, this study packaged and compared the filtered point cloud data, indicating a very good filtering effect.
Key words: subway tunnel; point cloud grid transformation; point cloud filtering; Kriging interpolation; wavelet analysis

近年来,中国城市轨道交通得到了快速发展,预计到 2020 年,总运营里程将超过 6 000 km,比 2015 年增加 82.56%^[1]。为了保证城市地铁施工和运营安全,应根据需要对地铁进行结构监测和保护区监测^[2]。由于传统监测方法存在监测效率低以及不能获取隧道全断面变形等因素,将三维激光扫描技术应用于地铁隧道监测成为目前研究的热点^[3-4]。隧道变形小,对监测精度要求高,三维激光扫描技术受仪器自身性能、点云滤波效果、三维建模精度等因素的影响,实际应用效果差,监测精度低,需要设法提高三维激光扫描技术的应用精度,其中提高点云滤波的精度十分关键。目前,点云数据滤波方法主要有形态学滤波算法、迭代线性最小二乘内插法、基于分类的算法、基于地形坡度的方法、拟合法等^[5-7],对于变形量较小的地铁隧道点云数据,

基金项目: 江苏省研究生科研与实践创新计划项目(KYCX17_0506);江苏省地质矿产勘查局科研项目(2016-KY-03)
作者简介: 王涛(1992—),男,硕士研究生,主要从事测量数据处理、三维激光技术应用。E-mail:hkingt121@163.com
通信作者: 田林亚,教授。E-mail:lytian3609@sina.com
引用本文: 王涛,田林亚,侯建梅,等.点云格网化滤波方法及其在隧道变形监测中的应用[J].河海大学学报(自然科学版),2018,46(5):451-457.
WANG Tao, TIAN Linya, HOU Jianmei, et al. Method of the point clouds filtering by grid handling and its application in the deformation monitoring of tunnel[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2018, 46(5): 451-457.

这些滤波方法的效果不甚理想。点云的滤波方式总体上可分为2种,一是直接对所有点云进行滤波,另一种是先对点云进行格网化,然后对格网化的点云进行滤波^[8-11]。目前,点云格网化已经成为辅助点云数据处理的有效方式,本文将隧道点云的格网化处理作为点云滤波的基础。

小波分析具有优异的时频特性及多分辨率能力,在一维时间序列和二维图像处理领域中都取得了很好的应用效果^[12-13]。笔者根据南京地铁隧道扫描点云特性,提出一种新的点云滤波方法,以隧道点云格网化为基础,将小波分析应用于隧道点云的滤波处理。

1 点云格网化

三维激光扫描技术可以得到目标物表面点的空间位置信息,这些信息是高密度离散三维数据点的集合,称为点云。点云具有如下特征:(a)立体化,点云包含所有采样点空间三维坐标(X,Y,Z),仅展示点云信息就可以表达出被扫描物体的大致形态;(b)数据量大,通过三维激光扫描仪强大的激光特性,一站扫描可以得到几十万到几百万个点云数据;(c)高密度,根据需要设置扫描仪的采样间隔(最小达1mm),可以得到高密度离散点云。

离散点云内插成规则格网数据的过程称为点云的格网化^[14]。按照内插点的分布范围不同,可以将内插分为整体内插、分块内插和逐点内插^[15],三维激光扫描的点云内插一般采用分块插值,分块插值常用的插值方法有加权反距离插值法、克里格插值法、最小曲率插值法、最邻近点插值法、三角形剖分插值法、多项式回归插值法等。多项式回归法消除了原始点云的局部细节,不能对点云数据进行详细分析;三角剖分法适合中等数量、均匀分布数据的网格化,在较为稀疏的数据区域可能会形成截断的插值面;最邻近点法适用于数据点间隔均匀和分布较规则的数据类型,针对散乱点云的格网化效果较差。因此,多项式回归法、三角剖分法、最邻近点法都不适用于地铁隧道点云的格网化处理。笔者详细介绍其他3种插值方法。

a. 克里格插值法。基本原理是利用变差函数,根据点云数据中相邻变量所揭示的区域化变量的内在联系求取空间变量。其优点是能表达出原始数据的趋势特征,避免了孤立插值的情况。克里格插值法是一种应用十分广泛的插值方法,有不同的变化形式,适用于各种离散型的数据,获得的网格化精度较高。

b. 加权反距离插值法。设平面内有已知位置信息和属性信息的一系列离散点云,其中任意一点P的属性值由其周围离散点的属性值通过距离加权插值求取,权值大小由待插点P与周围离散点间的距离决定,一般是两点间距离n次方的倒数。该方法的主要思想是:每一个观测值都受到邻近区域观测值的影响,且影响的大小与距离成反比。插值结果整体性较好,但是受数据点集群影响严重,插值结果中存在孤立点数据插值面高于周围数据点的情况。

c. 最小曲率插值法。该方法的主要思想:通过多次迭代方法求取格网节点数值,获得的插值面具有最小曲率,每个数据点也有最小曲率。该方法采用整体的数据参与网格化,特别适合于分布不均匀的数据,能表达原始数据的特征,产生的插值面较为光滑,整体曲面较为美观,但不能获得精确的插值结果。

格网化作为一种数据转换方法,在建立等高线、数字高程模型、数据滤波等方面发挥了重要的作用。针对点云数据的特点,将格网化方法应用于点云数据降维被认为是可行的,但是格网化方法众多,不同方法的数学模型不同,遍历点云的方式也不同,格网化方法的差异对点云滤波效果存在很大影响。

2 基于小波分析的点云格网化滤波

2.1 小波分析理论

小波分析的主要思想是小波变换,小波变换是将信号分解成一系列小波基函数的叠加^[16],可以视为被变换函数与小波基函数的卷积。将 $L^2(\mathbf{R})$ 实数空间中的任意函数 $f(t)$,在小波母函数 $\phi(t)$ 下展开,称为函数 $f(t)$ 的小波变换,其公式如下:

$$W_f(a,\tau)=\langle f(t),\phi_{a,\tau}(t)\rangle=\frac{1}{\sqrt{a}}\int_{\mathbf{R}}f(t)\bar{\phi}\left(\frac{t-\tau}{a}\right)dt$$

(1)

式中:a——伸缩因子; τ ——平移因子。

小波分析具有时频特性及多分辨率特性,使其在数据滤波领域得到了很好的应用。根据小波多分辨率特性,将信号分解为低频和高频两部分,其中低频信号表现为信号的变化趋势,反映了事物有规律的变化,而

高频部分表现为信号的异常和各种噪声引起的不正常突变,据此可以对信号进行异常探测。

2.2 点云格网化滤波步骤

基于小波分析的点云格网化滤波的基本思想:先选择合适的插值方法对点云进行格网化处理,获得格网化点云数据,再提取格网化点云数据进行小波分析,将小波分析结果进行逆变换获得滤波后的点云。具体步骤如下:

a. 确定分块大小。三维点云数据需要在二维 XY 面内进行网格划分,因此需要确定点云数据 XY 平面的大小,即确定 (X_{min}, X_{max}) 、 (Y_{min}, Y_{max}) ,然后将研究区 XY 平面从 X (或 Y) 方向以间隔 m 、 Y (或 X) 方向以间隔 n ,依次分割为 $m \times n$ 个单元格,单元格的大小根据扫描区域及点云间隔确定,设单元格边长为 g_x, g_y ,则单元格的大小可以用下式表示:

$$g_x = \frac{X_{max} - X_{min}}{m} \qquad g_y = \frac{Y_{max} - Y_{min}}{n}$$

(2)

分块太大会隐藏点云特征和细节,也会影响滤波效果,分块太小会增加运算量,实际应用中要根据点云数据总量和数据间隔合理划分网格间隔大小。

b. 格网化。选择合适的插值方法,按照已确定的分块大小进行格网化。格网化内插方法众多,不同插值方法数学模型不同,插值精度不同,对点云滤波结果的影响也不同。本文将结合地铁隧道点云数据进行分析,以获得较好的格网化插值效果。

c. 提取数据。格网化后,按照分块顺序从左沿 X 方向、从下沿 Y 方向依次获得格网点数值。

d. 小波异常值探测和小波阈值去噪。首先对格网化点云进行异常值探测,剔除异常点,然后进行小波阈值去噪,获得去噪后的数值序列,并利用信噪比、均方根误差、平滑度指标对去噪结果量化分析。小波阈值去噪是一种简单有效的去噪方法,主要步骤如下:(a)小波分解。选择一个合适的小波基函数和合理的小波分解尺度 N ,对数据序列进行小波分解;(b)高频系数阈值量化。对分解后各尺度的高频部分,选择合适的阈值 δ 进行处理,所有小于 δ 的小波系数被划为噪声,取零,而超过阈值 δ 的小波系数的数值被缩减后再重新取值;(c)小波重构。将分解后各层低频部分和经阈值处理后的高频部分进行小波重构。(d)数值序列逆变换。将滤波后的数值序列进行逆格网化处理,获得变换后的点云数据。

3 试验分析

3.1 试验数据

对南京地铁 2 号线保护区进行监测时,采用 FARO Focus 3D 地面三维激光扫描仪扫描隧道。扫描速度为 976 000 点/s,测量精度为 ± 2 mm (25 m 以内测程),扫描范围为水平方向 360° ,竖直方向 305° 。隧道扫描的一个关键问题是点云的配准,由于测区有已知点可以利用,采用了基于大地控制点的配准方法来提高配准精度,经配准后获得了地铁隧道点云数据如图 1 所示。

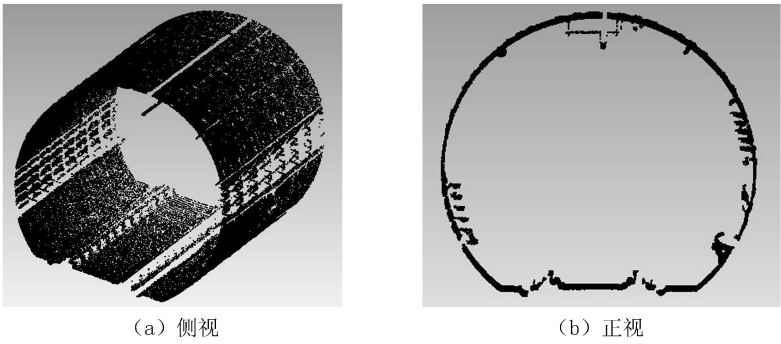


图 1 地铁隧道点云数据

Fig. 1 Point cloud data of subway tunnel

3.2 格网化试验

为了解不同插值方法的差异,试验分析了隧道点云不同格网化方法的效果,试验时控制其他变量不变,仅改变插值方法,对插值结果进行对比分析。为了更好地进行试验,本文截取了部分点云(图 2)。图 2(b)

显示隧道存在开挖及建设形成的大量内壁凸起点,这些凸起点会影响点云三维建模和断面提取精度,需要设法消除或减弱。

格网化的第一步就是要确定分块网格的大小。在截取的点云中, X 、 Y 的取值范围分别是 $(-4.324\ 0\ \text{m}, 1.422\ 9\ \text{m})$ 和 $(10.5393\ \text{m}, 17.0831\ \text{m})$,考虑到格网化后隧道的整体趋势和局部细节,格网数量为 88×100 。第二步分别对加权反距离插值法、克里格插值法、最小曲率插值法的格网化效果进行试验分析。基于 OpenGL 软件平台利用 VC++ 软件编写了以上 3 种格网化方法的处理程序,格网化处理结果如图 3~5 所示。

由图 3~5 可知,格网化后基本保持了隧道的原始特征,3 种插值方法存在明显差异。最小曲率插值法由于需要限制曲率最小,因此格网化后平滑性较好,获得的结果较为美观,但是插值结果容易出现与实际情况不符的伪趋势现象。加权反距离插值和克里格插值结果差别不大,两者均能很好地表现整体趋势和局部细节,但加权反距离插值边缘趋势明显高于内部,这是因为孤立点对平滑的影响比较大,克里格插值整体表现更好。综上,隧道点云格网化中,加权反距离插值和克里格插值法都获得了很好的效果,克里格插值法综合较好。

3.3 格网化

选择格网化效果较好的克里格插值法应用于隧道点云格网化,为了方便编程实现小波分析处理,本文设置网格的数量为 20×30 。克里格插值结果如图 6 所示,提取了前 6 行网格点数值(X,Y,Z),见表 1。

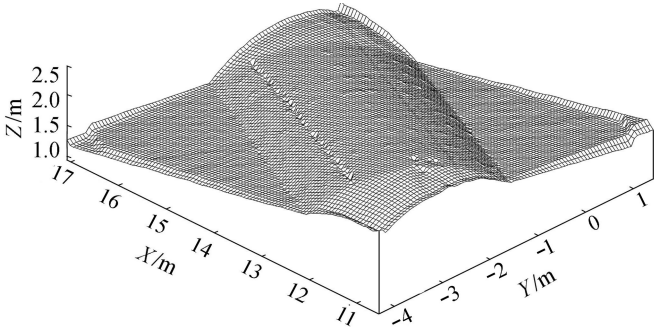


图 3 克里格插值结果
Fig.3 Result of the Kriging interpolation

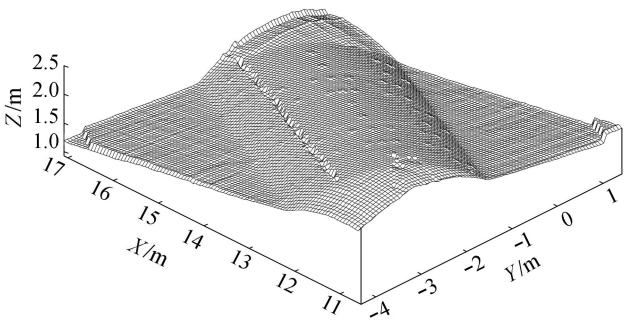


图 4 加权反距离插值结果
Fig.4 Result of the weighted inverse distance interpolation

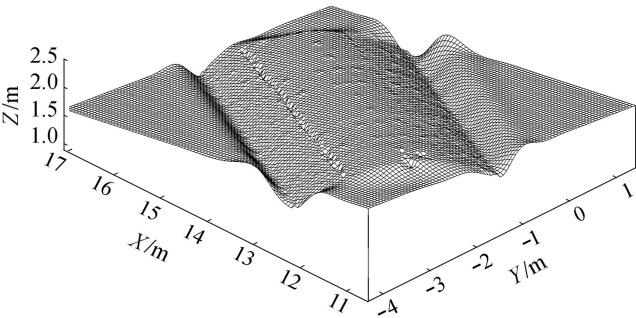


图 5 最小曲率插值结果
Fig.5 Result of the minimum curvature interpolation

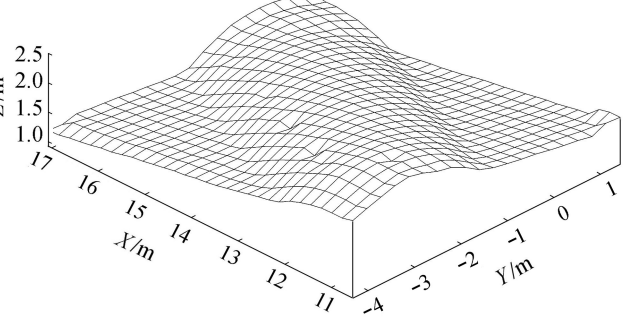


图 6 克里格格网化结果
Fig.6 Result of the Kriging grid transformation

3.4 格网化点云小波滤波

选择格网化后的网格点 Z 值数据进行异常值探测和小波阈值去噪。首先进行异常值探测,试验选取其中的一段数据序列 Z_1 ,在数据序列 10 处增加异常值为 2.4368。图 7(a) 为添加异常值后的数据序列,从中无法判断数据序列是否存在异常值及异常值位置。将数据序列分解为低频部分(图 7(b))和高频部分(图 7(c)),根据小波异常值探测原理,认为在信号的高频分解中的严重震荡即为异常部分^[17]。从图 7(c) 明显可以看出信号在序列 10 处引起的震荡,可以认为是异常信号,在应用中应给予剔除,而图 7(b) 中的低频部分

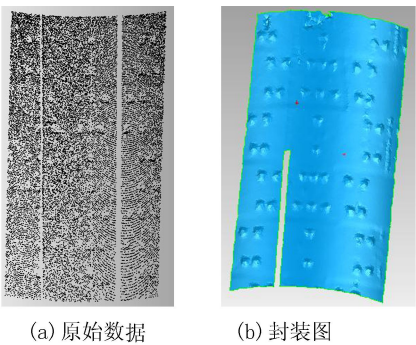


图 2 截取点云数据
Fig.2 The intercepted data of point cloud

表现了信号的整体变化。试验证明了小波分析在点云格网化数据异常探测的能力,据此对所有数据序列进行异常值探测。

表 1 网格点坐标值
Table 1 Coordinate values of grid points m

X	Z1	Z2	Z3	Z4
	Y=10. 54	Y=10. 76	Y=10. 99	Y=11. 22
-4. 32	2. 248 6	2. 202 4	2. 201 6	2. 193 6
-4. 02	2. 334 5	2. 289 5	2. 302 2	2. 296 4
-3. 72	2. 408 5	2. 372 8	2. 388 8	2. 391 5
-3. 42	2. 481 3	2. 431 2	2. 455 2	2. 461 0
-3. 11	2. 515 7	2. 482 1	2. 483 3	2. 482 2
-2. 81	2. 456 9	2. 450 4	2. 471 5	2. 391 6
-2. 51	2. 365 9	2. 386 7	2. 431 1	2. 426 3
-2. 21	2. 313 3	2. 343 2	2. 358 4	2. 356 1
-1. 90	2. 194 8	2. 231 7	2. 245 1	2. 254 4
-1. 60	2. 036 8	2. 072 2	2. 100 0	2. 128 5
-1. 30	1. 951 3	1. 922 4	1. 922 7	1. 955 9
-1. 00	1. 901 9	1. 866 9	1. 838 1	1. 821 8
-0. 69	1. 857 6	1. 824 8	1. 791 2	1. 769 2
-0. 39	1. 823 5	1. 791 6	1. 759 6	1. 735 2
-0. 09	1. 772 5	1. 750 2	1. 721 0	1. 691 4
0. 21	1. 729 2	1. 719 9	1. 685 7	1. 657 7
0. 52	1. 694 8	1. 685 5	1. 652 9	1. 627 7
0. 82	1. 642 8	1. 644 5	1. 615 4	1. 583 8
1. 12	1. 749 9	1. 617 8	1. 575 9	1. 543 5
1. 42	1. 731 3	1. 729 3	1. 684 8	1. 524 3

下面进行点云格网化去噪,采用小波阈值去噪法,本文仅选择 Z1 和 Z4 网格点数据序列为例进行分析。试验时选择去噪效果好的全局小波软阈值,选择 3 层最佳分解尺度,选择小波变换效果好的 sym3 小波基,基于 MATLAB 软件实现了小波阈值去噪,利用信噪比、均方根误差、平滑度指标对去噪结果评价分析(表 2)。原始数据序列和去噪结果分别如图 8、图 9 所示。

从图 8(b)、图 9(b) 可以看出,经小波阈值去噪后,获得了较为平滑的数据序列,达到了滤波效果,表 2 评价指标也验证了小波阈值去噪的效果。采用相同的方法,对所有数据序列进行小波阈值去噪。对所有格网化点云经异常值探测和小波阈值去噪,获得滤波后点云格网化数值,表 1 数据序列经滤波后如表 3 所示,滤波后格网化结果如图 10 所示。图 10 与图 6 对比可以发现,格网化点云经小波滤波处理以后,点云凸起处得到了有效平滑,整体滤波效果较好。格网化点云经小波滤波处理后,再经逆格网化变换获得滤波后的点云,滤波点云和其封装结果如图 11 所示,可以认为格网化点云小波滤波是有效的。

4 结 语

三维激光扫描仪精度和实用性日益增强,设法改进点云滤波方法和提高点云滤波精度十分重要。小波分析理论成熟、方法完善,应用小波分析法进行滤波可

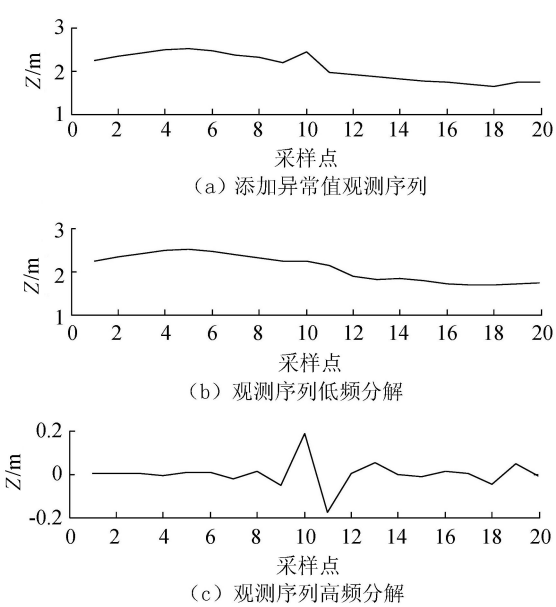


图 7 小波异常值探测

Fig. 7 Abnormal value detection using wavelet

表 2 去噪评价指标

Table 2 Evaluating index of grid points after filtering			
数据	信噪比	均方根误差	平滑度
Z1	95. 125 6	0. 279 0	0. 081 4
Z4	94. 733 9	0. 279 7	0. 788 5

表 3 滤波后网格点坐标值

Table 3 Coordinate values de-noising m				
X	Z1	Z2	Z3	Z4
	Y=10. 54	Y=10. 76	Y=10. 99	Y=11. 22
-4. 32	2. 374 2	2. 247 2	2. 252 2	2. 244 4
-4. 02	2. 416 4	2. 325 0	2. 334 8	2. 325 8
-3. 72	2. 455 3	2. 383 9	2. 396 6	2. 385 6
-3. 42	2. 502 7	2. 462 2	2. 479 3	2. 466 2
-3. 11	2. 455 5	2. 445 9	2. 465 7	2. 454 7
-2. 81	2. 371 7	2. 396 5	2. 418 8	2. 411 4
-2. 51	2. 300 8	2. 371 1	2. 397 4	2. 393 4
-2. 21	2. 208 4	2. 330 5	2. 361 0	2. 361 5
-1. 90	2. 138 8	2. 239 4	2. 260 8	2. 260 7
-1. 60	2. 070 3	2. 122 2	2. 129 0	2. 126 6
-1. 30	1. 978 5	1. 991 6	1. 984 7	1. 981 4
-1. 00	1. 879 6	1. 837 6	1. 813 6	1. 808 6
-0. 69	1. 843 9	1. 789 3	1. 762 1	1. 757 3
-0. 39	1. 829 3	1. 773 7	1. 747 6	1. 743 7
-0. 09	1. 804 6	1. 729 2	1. 700 0	1. 696 1
0. 21	1. 792 0	1. 699 0	1. 668 3	1. 664 6
0. 52	1. 768 1	1. 686 4	1. 651 7	1. 619 6
0. 82	1. 743 9	1. 684 9	1. 645 5	1. 572 9
1. 12	1. 732 9	1. 697 1	1. 654 9	1. 543 1
1. 42	1. 726 1	1. 722 3	1. 677 4	1. 518 3

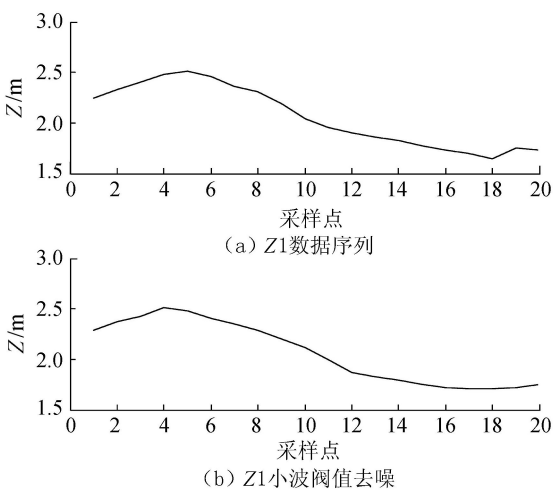


图8 Z1小波阈值去噪结果

Fig.8 De-noising result of wavelet threshold on Z1

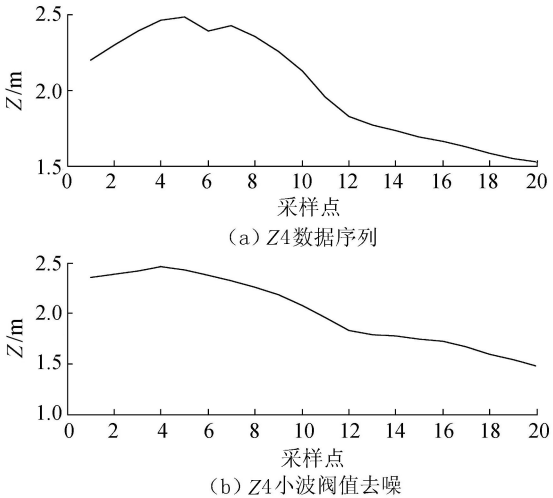


图9 Z4小波阈值去噪结果

Fig.9 De-noising result of wavelet threshold on Z4

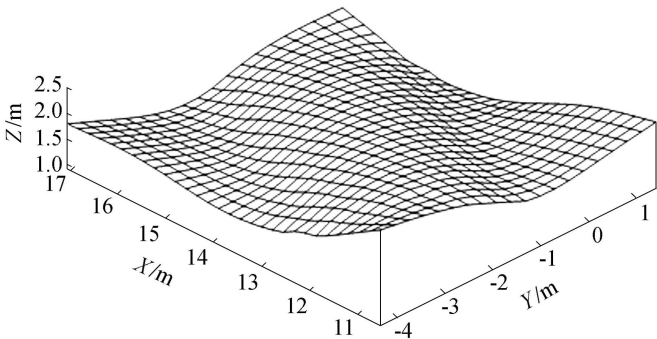


图10 格网化点云小波滤波结果

Fig.10 Wavelet filtering result on the grid-handled point cloud data

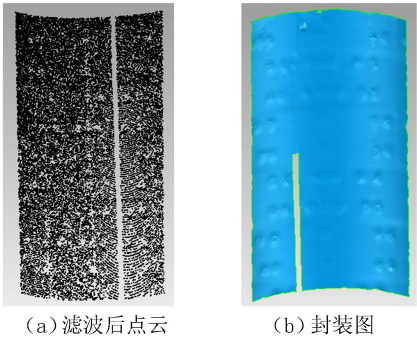


图11 滤波点云数据

Fig.11 Point cloud date after filtering

行性强,并拥有良好的评价指标,将小波分析在一维和二维数据滤波中的理论和技术应用于格网化点云滤波在理论和方法上都具有可行性。本文首次将小波分析理论应用于点云滤波,并以隧道点云为例试验分析,试验证明了本文方法的有效性。值得注意的几个问题是:(a)格网化点云中格网化的处理结果十分重要,在实际应用中要根据需要选择合适的网格大小和格网化方法;(b)本文仅研究了XY平面的点云格网化,实际应用中可以根据需要将点云在XZ平面(或YZ平面)分别格网化,获得Y值(或X值)的滤波结果;(c)小波滤波理论丰富、方法众多,深刻挖掘和使用合适的小波滤波方法有助于获得更好的点云滤波结果。

参考文献:

[1] 城市轨道交通研究. 中国城市轨道交通发展迅猛[EB/OL]. (2016-08-03)[2017-05-30]. <http://www.umt1998.com/html/cglt/104336.html>.

[2] 张笑星. 地铁隧道结构变形和地铁运营安全自动监测的研究和应用[J]. 现代隧道技术,2008(增刊1):191-197. (ZHANG Xiaoxing. The subway tunnel structure deformation and the subway operation safety research and application of the automatic monitoring[J]. Modern Tunnelling Technolgy,2008(Sup1):191-197. (in Chinese))

[3] 刘绍堂,潘洁晨. 一种隧道整体收敛变形的表达方法[J]. 现代隧道技术,2013(5):34-37,44. (LIU Shaotang, PAN Jiechen. An expression relating the overall convergence and deformation of tunnels[J]. Modern Tunnelling Technology, 2013(5):34-37,44. (in Chinese))

[4] 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))

- [5] VOSSelman G. Slope based filtering of laser altimetry data[J]. IAPRS, 2000,33:935-942.
- [6] KRAUS K, PFEIFER N. Determination of terrain models in wood-ed areas with airborne laser scanner data[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 1998, 53(4):193-203.
- [7] ZHANG Keqi, CHEN Shuching, WHITMAN D, et al. A progressive morphological filter for removing nongroud measurements from airborne LIDAR data[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2003,41(4):872-882.
- [8] 孙正林. 三维激光扫描点云数据滤波方法研究[D]. 长沙:中南大学, 2011.
- [9] 左志权,张祖勋,张剑清. 知识引导下的城区 LiDAR 点云高精度三角网渐进滤波方法[J]. 测绘学报, 2012(2):246-251. (ZUO Zhiquan, ZHANG Zuxun, ZHANG Jianqing. A high-quality filtering method with adaptive TIN models for urban LiDAR points based on priori-knowledge[J]. ActaGeodaetica et Cartographica Sinica, 2012(2):246-251. (in Chinese))
- [10] 胡春梅,张旭,夏国芳,等. 基于柱面基准面的类柱面文物对象正射影像生成方法研究[J]. 激光杂志, 2015,36(8):28-31.
- [11] 吴军,李伟,彭智勇,等. 融合形态学灰度重建与三角网分层加密的 LiDAR 点云滤波[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2014,39(11):1298-1303. (WU Jun, LI Wei, PENG Zhiyong, et al. Integrating morphological grayscale reconstruction and TIN models for high-quality filtering of airborne LiDAR points[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2014,39(11):1298-1303. (in Chinese))
- [12] 王智文,李绍滋. 基于多元统计模型的分形小波自适应图像去噪[J]. 计算机学报, 2014,37(6):1380-1389. (WANG Zhiwen, LI Shaozi. Adaptive fractal-wavelet image denoising base on multivariate statistical model[J]. Chinese Journal of Computers, 2014,37(6):1380-1389. (in Chinese))
- [13] 李肃义,林君,阳贵红,等. 电性源时域地空电磁数据小波去噪方法研究[J]. 地球物理学报, 2013,56(9):3145-3152. (LI Suyi, LIN Jun, YANG Guihong, et al. Ground-airborne electromagnetic signals de-noising using a combined wavelet transform algorithm[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2013,56(9):3145-3152. (in Chinese))
- [14] 邬建伟,马洪超,李奇. 顾及语义的机载 LiDAR 点云格网化方法[J]. 测绘科学技术学报, 2008,25(2):87-89,93. (WU Jianwei, MA Hongchao, LI Qi. LiDAR data cloud gridding based on semantics[J]. Journal of Geomatics Science and Technology, 2008,25(2):87-89,93. (in Chinese))
- [15] 李志林,朱庆. 数字高程模型[M]. 武汉:武汉大学出版社, 2003.
- [16] 王涛,田林亚,侯建梅,等. 利用小波变换进行 GPS 振动观测值的异常探测[J]. 测绘工程, 2017,26(5):52-56. (WANG Tao, TIAN Linya, HOU Jianmei, et al. Using wave let transform to detect GPS vibratory observation date[J]. Engineering of Surveying and Mapping, 2017,26(5):52-56. (in Chinese))
- [17] 王坚,高井祥,苗李莉. 强污染单历元 GPS 形变信号的提取和粗差识别[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2004,29(5):416-419. (WANG Jian, GAO Jingxiang, MIAO Lili. Strong contaminated single epoch GPS deformation signals extracting and gross error detection[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2004,29(5):416-419. (in Chinese))

(收稿日期:2017-09-30 编辑:刘晓艳)