

利用改进的数学形态法进行车载激光点云地面滤波

卢秀山¹ 刘如飞¹ 田茂义¹ 刘冰¹

¹ 山东科技大学测绘科学与工程学院, 山东 青岛, 266590

摘要:通过分析车载激光点云的特征,提出了一种基于改进的数学形态法的地面滤波方法。该算法运用三维虚拟格网组织数据,在形态法迭代过程中采用环形结构元优化滤波窗口,利用局部区域自适应坡度阈值对形态法开运算进行控制。在获得初始低点后,基于邻域坡度滤波提取地面点。利用两个不同区域的点云数据进行了实验,以验证改进算法的有效性。

关键词:车载激光;地面滤波;数学形态法;坡度滤波

中图分类号:P237.4 **文献标志码:**A

车载激光移动测量技术作为一种先进的测量手段,具有快速、实时、主动及不与测量物接触等特点^[1]。相比于机载激光点云数据,车载平台能够采集更高精度、更高密度的地面、建筑物、植被等地物表面点云数据,因此,利用车载激光测量技术可以获取更加精确的局部地区地形数据。车载激光点云地面滤波主要对移动测量系统获取的分布在道路及两侧不同地物上、分布不规则的离散点进行处理和识别,将分布在地面上的点(称为地面点)与其他地物表面的点(如建筑物、车辆、树木及植被等,称为非地面点)进行分离^[2]。

目前,已有不少国内外学者对激光点云数据的滤波方法进行了研究。在机载方面,文献[3]提出了自适应 TIN 三角网加密方法处理城市区域机载数据。该算法首先根据少量的种子点建立一个稀疏的 TIN,然后通过迭代方法依据参数阈值对 TIN 进行不断加密;文献[4]提出了一种基于坡度变化的滤波算法,算法的关键在于选择合适的坡度阈值,认为应当根据实验区域地形的先验知识选择坡度阈值,由于需要包含所有地面形态的样本,增大了算法的难度;文献[5]提出利用不同尺寸窗口进行多次数学形态学滤波的方法,从最小窗口尺寸开始,对每个判断为地面点的数据根据窗口尺寸的大小赋予权值,逐步增加窗口尺寸,迭代处理,窗口越大,权值越大,最终根据所有判断出的地面点的权

重计算地形表面;文献[6]描述了一种渐进式形态学滤波算法来过滤地物点,即在运用数学形态学方法时依据地形坡度和窗口尺寸计算相应阈值。在车载方面,文献[7]提出了一种基于扫描线的车载激光雷达点云滤波方法,依据坡度差值将扫描线分成不同的线段集合进行分类;文献[8]提出基于点云空间特征向量进行聚类分析,通过计算法线方向和特征值进行人行道、路面、路缘等分类。

目前,针对机载点云数据地面滤波的研究较多,主要包括数学形态法、TIN 三角网加密法和基于坡度滤波法和基于曲面约束的方法等^[9],但由于扫描距离、目标、密度及精度的不同,车载点云数据滤波不能直接沿用机载的处理方法,而现有的车载点云研究大多针对独立地物的提取,在地面滤波时通常仅依据简单的高程阈值进行判断,并未综合考虑地物点云的空间分布特征和地形特征,提取出的地面点云包含了大量的非地面点。本文主要通过研究车载激光点云的数据特征,提出了一种适用于车载激光点云地面滤波的改进的数学形态法,该改进方法主要对形态学滤波中的数据组织、窗口结构元设置和开运算控制进行优化。

1 数学形态法分析

1.1 数学形态学原理

数学形态学理论是利用集合运算原理提取图

收稿日期:2013-04-08

项目来源:国家科技支撑计划资助项目(2011BAK07B01);现代城市测绘国家测绘地理信息局重点实验室开放课题资助项目(20111204W);山东科技大学研究生创新基金资助项目(YC130103)。

第一作者:卢秀山,博士,教授,博士生导师。现主要从事测量数据处理理论及应用、GPS 应用技术的研究和教学。E-mail: xiushanl@vip.sina.com

像中的特征。腐蚀和膨胀运算是形态学图像处理的基础算子,通常用于“减少”(腐蚀)或“增大”(膨胀)图像中特征的尺寸。基于灰度图像的腐蚀和膨胀运算是在结构元定义的邻域内选择最小或最大图像像素值替换原始像素值^[10]。

1993年,德国斯图加特大学的 Lindenberger 最早提出将数字形态学应用于 LiDAR 点云数据滤波,提出了一维数学形态学算法用于点云数据的处理^[10]。在采用数学形态学对 LiDAR 点云数据进行滤波时,需要将离散的 LiDAR 点云数据生成规则格网化的数字表面模型(digital surface model, DSM)。在运算时一般不单独使用两个基础算子,而是将两个基础算子进行组合运算,主要是开运算和闭运算两个算子,先腐蚀后膨胀的过程称为开运算,相反为闭运算。

1.2 存在的问题

基于传统数学形态学理论的 LiDAR 点云数据滤波方法的缺点是算法易受到滤波窗口大小的影响,具体表现在两个方面:一是如果窗口结构元尺寸过小,则无法去除一些尺寸较大的凸起(如建筑物);二是如果结构元尺寸过大,则在过滤较大地物的同时,地形起伏较小的区域也会被去除,导致地形细节过度滤波。但由于实际地形的复杂性,现实中基本不存在既可以保护地形细节,也可以过滤掉地面物体的结构元。因此,一些学者借用多尺度滤波的方法,采用逐渐增加滤波窗口尺寸的方式进行滤波处理^[2,5-6,10],即在滤波过程中不仅渐进改变窗口结构元的尺寸,同时也根据尺寸大小实时地调整开运算的高度阈值。高度阈值计算公式为:

$$dh_k = \begin{cases} dh_0, \omega_k \leq 3 \\ s \times (\omega_k - \omega_{k-1}) \times c + dh_0, \omega_k > 3 \\ dh_{\max}, dh_k > dh_{\max} \end{cases} \quad (1)$$

式中, ω_k 为第 k 次滤波的窗口大小,其增长方式为:线性增长 $\omega_k = 2kb + 1$ 和指数增长 $\omega_k = 2b^k + 1$, b 是初始窗口边长; c 为 DSM 的格网间距; dh_0 和 dh_{\max} 分别为最小和最大高差阈值; s 为地形坡度参数。

从式(1)可以看出,当滤波窗口增大时,高差阈值 dh_k 随之增大,增幅大小由地形坡度 s 决定。如果 DSM 中某个格网开运算前后的高程值之差小于对应的高差阈值 dh_k , 则认为是地面点,否则,认为是非地面点。如果将上述多尺度数学形态滤波方法应用到车载点云数据滤波会产生如下问题。

1) 车载点云数据密度高,数据量大,点云分布特征不同于机载点云数据,采用传统的机载规则格网创建方式和窗口滤波结构元降低了数据处理的精度和效率。对于具有一定分布规则的车载点云数据,如何创建格网和选择合适的结构元?

2) 在确定坡度阈值 s 时,由手工根据地形起伏情况录入,通常假设较小的城市区域坡度取值较小,而在山区其取值较大。车载激光扫描区域的局部坡度变化复杂,如何能够自适应调整区域坡度,提高算法的自适应能力?

2 数学形态学改进

本文将从点云数据组织、形态学结构元优化和开运算控制等方面进行算法改进,流程见图 1。

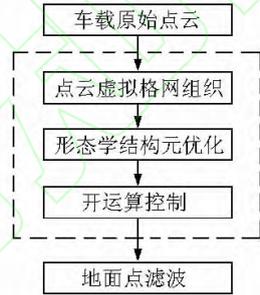


图 1 算法改进流程图

Fig. 1 Flow Chart of Improved Algorithm

2.1 点云数据组织

文献[11]将三维虚拟网格的概念引入到点云数据处理中,克服了其他数据组织方式运算效率低和信息损失的问题。由于车载激光扫描系统获取的是道路及两侧的点云,为了保存点云的空间形态特征,本文选择道路的中心线作为基准,建立对称分布于道路两侧的格网,使得格网邻域关系尽可能与实际地物空间形态一致,在生成初始格网 DSM 时,假定每个格网的最低点作为地面点,将该点存入格网地址中,而不需要进行内插。如图 2 所示,在原始数据的俯视图中,虚线为道路中心线,长方形线框内为树木,椭圆形线框内为建筑物立面,蓝色虚线为理想格网分布。本文在建立虚拟格网时,为提高数据处理自动化效率,将车载移动平台的行驶轨迹数据作为中心线构建格网。

在确定格网大小时,需根据扫描区域的地形最大坡度和扫描点密度进行设置,当坡度较大或点密度较高时,为了更好地保留原始地面细节特征,需设置较小的格网。建立坡度、高差和格网步长的关系式和步长与密度关系式:

$$\text{slope} = \frac{\Delta h}{\sqrt{(x_{\text{step}})^2 + (y_{\text{step}})^2}} \quad (2)$$

$$n = (x_{\text{step}}/d) \times (y_{\text{step}}/d) \quad (3)$$

其中, slope 为坡度; Δh 为格网内地面高程差值; x_{step} 和 y_{step} 分别是 x 、 y 方向的步长; n 为格网内点数; d 为平均点距。由式(2), 假定城区最大地形坡度为 10%, 格网近似水平时假定地面点最大高差为 0.2 m, 则可以根据公式算出格网的对角线距离为 $\sqrt{2}m$, 确定方形格网为 1 m \times 1 m。由式(3), 当设置格网内点密度大于 10 时, 平均点距 0.1 m, 则方形格网步长不小于 0.3 m。步长设置需同时满足这两个条件。虚拟网格示意图如图 3 所示, 圆点代表点云, 长方体块代表三维虚拟格网。

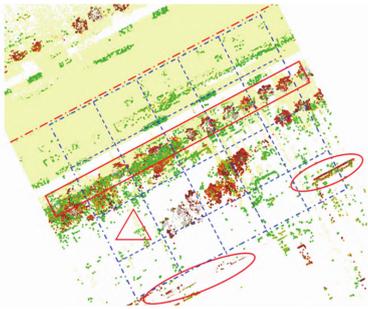


图2 网格最佳分布

Fig. 2 Best Distribution Grid

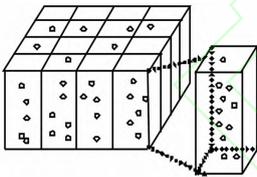


图3 三维虚拟格网

Fig. 3 Three-Dimensional Virtual Grid

2.2 结构元选取

车载激光点云中非地面点多为地物立面点, 由于车载移动平台是沿着道路扫描, 距离道路较远区域的地面点通常都被道路两侧地物遮挡, 如图 2 中的三角形区域, 导致地面点空间非连续分布, 因此, 按照传统车载滤波方法, 设置最后一次迭代窗口尺寸大于实验区域中最大建筑物的面积, 也很难去除建筑物的高点。同时, 随着窗口结构元的不断增大, 加入运算的格网数也随之增加, 增大了计算量。本文根据车载点云的空间分布特征, 选择应用环形结构元减少计算量, 根据较高地物到最近地面点的水平距离确定结构元的大小。具体方法是: 车载激光扫描范围为道路及两侧, 而道路上必然能够提取到地面点, 根据道路边缘到

道路两侧地物的最大实际水平距离 S 确定窗口结构元大小, 环形结构元到中心的间隔格网数为 $n_k = \lfloor S/c \rfloor + 1$, c 为格网边长。如图 4 所示, 假定两侧地物到道路边缘的距离为 8 m, 格网边长为 3 m, 则间隔格网数为 3, A 格网的环形结构元为红色区域格网。

2	1	1	1	1
3	2	2	2	1
4	2	A	2	1
3	2	2	2	1
2	1	1	1	1

图4 环形窗口结构元

Fig. 4 Circular Window Structure

2.3 利用自适应坡度阈值控制开运算

在运用数学形态开运算进行地面点滤波时, 主要包括腐蚀、膨胀和地面点确定等步骤。在多尺度滤波中, 利用给定的区域坡度计算窗口高差阈值, 然后将开运算前后的高程值之差与对应高差阈值进行比较, 以确定地面点, 即相当于在地面点确定环节对滤波进行控制, 但腐蚀与膨胀并没有加以约束, 具有一定的盲目性。针对此问题, 本文提出的改进算法通过估计局部范围内的近似坡度, 提高算法的自适应性, 然后利用自适应的坡度估计阈值实现整个开运算过程的控制, 最大限度地保留地形细节信息。

2.3.1 局部近似坡度估计

局部近似坡度估计的基本原理是通过计算窗口结构元内的坡度变化情况确定最佳坡度阈值, 其原理简述如下。

1) 获取每个三维虚拟格网的最低点, 然后由格网 A 中的低点和环形结构元格网中的低点建立 Delaunay 三角网^[3,12], 约束三角形边长大于 $1/2$ 格网边长, 计算三角面相对于水平面的坡度 S_i 。

2) 计算三角面坡度的标准差 SD , 用来表示平面的粗糙度。标准差越大, 粗糙度越大, 局部坡度则变化越大; 反之, 则越小。

3) 在估计坡度时, 由式(4)计算 A 格网点 $a(x_a, y_a, z_a)$ 与环形结构元格网中的点 $b(x_b, y_b, z_b)$ 的坡度阈值 S_a 。

$$S_a = \frac{(z_a - z_b)}{\sqrt{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2}} \quad (4)$$

首先确定 A 格网是否为高点或是低点, 当 S_a 均大于 0 时, 该点为区域高点; 当 S_a 均小于 0 时, 该点为区域低点。当为高点或低点时, 将三角面

坡度 S_i 按顺序排列,取坡度中值作为 S_0 的值;若非高点或低点,根据实验本文设定的粗糙度阈值为 0.15,当标准差 SD 大于阈值时,取中值作为 S_0 的值,当标准差小于阈值时,取坡度最大值为 S_0 的值。如式(5)所示。

$$\begin{cases} S_0 = S_{\text{mean}}, \min Sa > 0 \parallel \max Sa < 0 \\ \quad (Sa \in W) \\ S_0 = S_{\text{mean}}, SD > 0.15 \\ S_0 = S_{\text{max}}, SD < 0.15 \end{cases} \quad (5)$$

式中, S_{mean} 为坡度中值; S_{max} 为坡度最大值; W 为 A 格网点与环形结构元点的坡度 S_a 的集合。

2.3.2 腐蚀与膨胀控制

在 A 格网的腐蚀 E_a 与膨胀 D_a 的过程中,首先,判定 A 格网是否为孤立点,环形结构元中的存在低点的格网数 $n > 2$ 时,为非孤立点,否则去除格网点 A ;然后,计算坡度 S_a ,求取符合条件 $S_a > S_0$ 的所有结构元格网的最小 z 值,作为 A 格网点的腐蚀运算值;同样,在膨胀运算时,将式(4)分子变为 $(z_b - z_a)$,求取所有符合条件的格网的最大 z 值作为膨胀值。如式(6)所示。

$$\begin{cases} E_a = \min(z_b), Sa > S_0 \\ (x_b, y_b) \in \omega \\ D_a = \max(z_b), Sa > S_0 \\ (x_b, y_b) \in \omega \end{cases} \quad (6)$$

式中, (x_b, y_b, z_b) 为结构元格网中的点坐标; ω 为结构元的窗口范围。

2.3.3 地面点确定控制

进行腐蚀与膨胀运算之后,需要将开运算前后的高程差值与对应高差阈值进行比较来最终确定格网低点是否为地面点,高差阈值由区域坡度和结构元大小决定,如式(7):

$$dh_k = S_0 \times n_k \times c + dh_0 \quad (7)$$

式中, S_0 为近似坡度; n_k 为环形格网到中心间隔的格网数; c 为格网边长(方形格网); dh_0 为点云的高程误差。

2.4 基于坡度阈值的地面点提取

通过改进的数学形态法,可以提取区域内所有包含地面点的格网。为进一步精确区分单个格网内的点云类别,本文将 8 邻域格网内的最低点作为参考点,由式(2)计算格网内待定点与 8 邻域的参考点的坡度。为了减少非地面点被误判为地面点,本文取其中的最大坡度作为该点坡度,若小于坡度阈值则为地面点,否则为非地面点^[13],坡度阈值为格网 8 邻域范围的近似坡度估计值,由 § 2.3.1 节的局部近似坡度估计方法获得。

3 实验与分析

为了检验本文提出的改进算法的有效性,选择城市道路和高速公路比较典型的两处区域进行实验。实验目的是提取城市与高速路的路面及两侧地面点。实验区域地物类型包括道路、建筑物立面、植被和汽车等,城区点云总数为 2 225 199,平均点距 3.5 cm,最大坡度 8%;高速路点云总数为 688 924,平均点距 8 cm,最大坡度 100%。

表 1 为改进算法运行的数据结果,其中,GN 表示格网数,PN 表示激光点个数。分别列举多尺度形态法、改进形态法和高程阈值法的滤波结果,其中,总数包含正确滤波点和粗差点,笔者通过手动方式提取出粗差点和实际地面点(存在一定误差)。相比于多尺度形态法,改进方法有效降低了格网处理数量和粗差点数;与传统高程阈值法相比,粗差点明显减少;3 种方法在城区平坦地区,准确滤波点与实际地面点相近,改进算法的优势在于减少了粗差点;在含有边坡的高速路地区,改进算法保留了更加完整的地面点,同时有效降低了粗差。可以看出,本文提出的改进方法能有效去除城区道路两侧的非地面点,同时,对于含有较大坡度边坡的高速路能较好地保留地形细节,提高了滤波效率。

表 1 数据处理结果统计

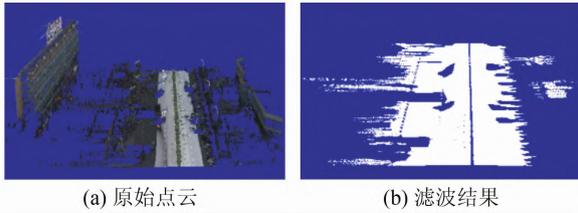
Tab.1 Statistics of Data Processing Results

实验区域	原始格网 GN	多尺度形态法		地面点 PN		改进形态法		地面点 PN		高程阈值法 PN		实际地面点 PN
		迭代次数	处理 GN	总数	粗差	迭代次数	处理 GN	总数	粗差	总数	粗差	
城区	9 825	5	8 827	913 705	20 532	6	5 260	898 437	5 212	907 489	10 545	903 652
高速路	4 952	5	3 714	448 693	8 662	6	4 049	518 371	4 325	450 465	9 342	527 126

图 5(a)为城区原始点云数据,数据地面坡度较小,道路与建筑之间存在明显的遮挡;图 5(b)为城区点云最终的滤波结果,从中可看出建筑物、植被和汽车等地物均被有效过滤。图 6 为算法改进前后城区地面获取情况,通过对比发现,改进算

法能有效去除图中左侧建筑物点,在图中右侧,台阶上地面点数量较少的区域也被去除,说明改进算法可以有效降低离群点的干扰。

图 7(a)为高速路原始点云数据,道路两侧的斜坡坡度较大,路面坡度较小,整个区域坡度变化



(a) 原始点云

(b) 滤波结果

图5 城区原始点云和滤波结果

Fig. 5 Original Point Cloud Data and Filtering Results of Urban

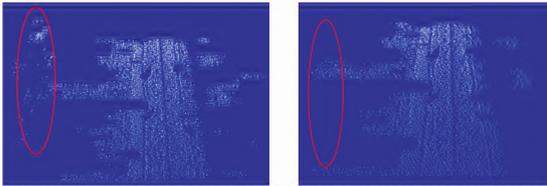
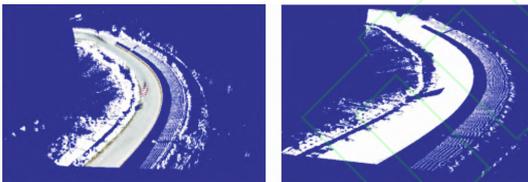


图6 算法改进前后对比(城区)

Fig. 6 Comparison Before and After Algorithm Improvement(Urban)

较大;图7(b)为最终点云滤波结果,从中可看出路面地面点保留完整,左侧斜坡由于受到低矮植被的影响,部分区域的地面出现空洞,但不影响斜坡地形的构建。图8为形态学算法改进前后地面滤波情况,通过对比发现,改进算法能有效获取图中左侧的斜坡上的地面点,更好地保留地形细节。



(a) 原始点云

(b) 滤波结果

图7 高速路原始点云和滤波结果

Fig. 7 Original Point Cloud Data and Filtering Results of Expressway

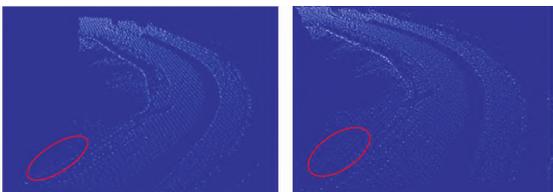


图8 算法改进前后对比(高速路)

Fig. 8 Comparison Before and After Algorithm Improvement (Expressway)

4 结 语

本文对车载激光点云数据的空间分布特征进行分析,用三维虚拟格网的方式组织数据,通过对

数学形态法的窗口结构元和开运算过程的控制进行优化,成功提取了不同地形条件下的地面点云数据,有效保留了地形的细节信息。实验结果证明,本文提出的车载激光点云地面点滤波方法适应性强,稳定性高。本文提出的方法对数学形态学滤波方法进行了改进,但是也无法完全避免误处理,还应进一步完善,特别是如何在坡度较大的地形情况下更准确地估计局部地形坡度,如何更好地滤除高速公路两侧斜坡上的低矮植被。

参 考 文 献

- [1] Shi Wenzhong, Li Bijun, Li Qingquan. A Method for Segmentation of Range Image Captured by Vehicle-borne Laserscanning Based on the Density of Projected Points [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2005, 34(2): 95-100(史文中,李必军,李清泉. 基于投影点密度的车载激光扫描距离图像分割方法[J]. 测绘学报, 2005, 34(2): 95-100)
- [2] Sui Lichun, Zhang Yibin, Liu Yan, et al. Filtering of Airborne LiDAR Point Cloud Data Based on the Adaptive Mathematical Morphology [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2010, 39(4): 390-396(隋立春,张熠斌,柳艳,等. 基于改进的数学形态学算法的LiDAR点云数据滤波[J]. 测绘学报, 2010, 39(4): 390-396)
- [3] Axelsson P. DEM Generation from Laser Scanner Data Using Adaptive TIN Models [J]. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2000, 33(B3/1): 119-126
- [4] Vosselman G. Slope Based Filtering of Laser Altimetry Data [J]. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2000, 33(B3): 935-942
- [5] Kilian J, Haala N, Englich M. Capture and Evaluation of Airborne Laser Scanner Data [J]. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 1996, 31(B3): 383-388
- [6] Zhang Keqi. A Progressive Morphological Filter for Removing Non-ground Measurements from Airborne LiDAR Data [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2003, 41(4): 872-882
- [7] Yang Yang, Zhang Yongsheng, Ma Yiwei, et al. A Point Cloud Filtering Method of Vehicle-Borne LiDAR Based on Scanning Beam [J]. *Journal of Geomatics Science and Technology*, 2010, 27(3): 209-212(杨洋,张永生,马一薇,等. 基于扫描线的车载

- 激光雷达点云滤波方法[J]. 测绘科学技术学报, 2010,27(3): 209-212)
- [8] El-Halawany S, Moussa A, Lichti D. Detection of Road Curb from Mobile Terrestrial Laser Scanner-point Cloud[C]. ISPRS Calgary 2011 Workshop, Calgary, Canada, 2011
- [9] Huang Xianfeng, Li Hui, Wang Xiao, et al. Filter Algorithms of Airborne LiDAR Data: Review and Prospects[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2009, 38(5): 466-469 (黄先锋, 李卉, 王潇, 等. 车载 LIDAR 数据滤波方法评述[J]. 测绘学报, 2009,38(5):466-469)
- [10] Lindenberger J. Laser-Profilmessungen zur Topographischen Gel. ndeaufnahme [D]. Stuttgart: Stuttgart University, 1993
- [11] Cho W, Jwa Y S, Chang H J, et al. Pseudo-Grid Based Building Extraction Using Airborne LIDAR Data[C]. The 20th ISPRS Congress, Istanbul, Turkey, 2004
- [12] Zeng Qihong, Mao Jianhua, Li Xianhua, et al. Planar-Fitting Filtering Algorithm for LiDAR Points Cloud [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2008, 33(1):26-28 (曾齐红, 毛建华, 李先华, 等. 激光雷达点云平面拟合过滤算法[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2008,33(1):26-28)
- [13] Sithole G, Vosselman G. Experimental Comparison of Filter Algorithms for Bare-Earth Extraction from Airborne Laser Scanning Point Clouds[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2004, 59(1/2):85-101

Ground Filtering of Vehicle-Borne Laser Point Cloud Based on Adaptive Mathematical Morphology

LU Xiushan¹ LIU Rufe¹ TIAN Maoyi¹ LIU Bing¹

¹ Geomatics College, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China

Abstract: On the basis of the analysis of vehicle-borne laser point cloud features, a ground filtering method based on the adaptive mathematical morphology is proposed. A three-dimensional virtual grid is used to organize data. In the morphological iterative process, the filtering window is optimized by annular structure and the morphological opening operation is controlled by a local adaptive slope threshold. After having obtained the initial low point, the ground point cloud data is extracted based on neighborhood slope. Finally, experiments are processed using two different regions in the point cloud data validating the algorithm.

Key words: vehicle-borne laser; ground filtering; mathematical morphology; slope filtering

First author: LU Xiushan, PhD, professor, his researches are focused on surveying data processing, GPS application and 3S integration. E-mail: xiushan@vip.sina.com

Foundation support: The National Key Technology Research and Development Program of the Ministry of Science and Technology of China, No. 2011BAK07B01; the Open Research Fund Program of Key Laboratory for Urban Geomatics of National Administration of Surveying, Mapping and Geoinformation, No. 20111204W; Graduate Innovation Fund Project of Shandong University of Science and Technology, No. YC130103.