

文章编号: 1007-4619(2008)04-0633-07

基于形态学梯度的机载激光扫描数据滤波方法

李 勇, 吴华意

(武汉大学 测绘遥感信息工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430079)

摘 要: 机载激光扫描技术能实时获取大范围、高精度的三维空间信息, 从而受到日益广泛的重视和应用。然而由于地理环境的复杂性, 其数据滤波一直是一个研究难点。针对数据点云的特点和滤波所面临的问题, 提出了一种基于形态学梯度的机载激光扫描数据滤波方法。使用改进的形态学梯度计算方法得到每个点的梯度, 再基于梯度选择特定的点进行迭代开运算, 并根据梯度直方图减少迭代的次数, 通过判断每次开运算后点的高程与原高程的差值是否小于一定的阈值, 逐步滤除非地面点。使用国际摄影测量与遥感学会 (ISPRS) 提供的测试数据对算法进行实验, 并与国际上 8 种滤波算法进行对比, 结果表明该算法对各种复杂环境的适应性强, 基于形态学梯度的滤波既能减少不必要的计算, 又能降低误差产生的可能, 从而在有效地去除非地面点的同时, 也能很好地保留地面点, 故具有良好的可靠性与实用性。

关键词: 机载激光扫描; 滤波; 数学形态学; 梯度

中图分类号: P23 **文献标识码:** A

1 引 言

机载激光扫描技术 (light detection and ranging LIDAR), 作为一种快速、低成本和大范围实时获取高精度三维空间信息的方法, 越来越受到广泛的重视和应用。机载激光扫描系统获取的是按照采集时间进行采样和存储的不规则三维激光脚点点云数据。这些离散的激光脚点有的是落在地面上, 有的是落在建筑物、植被、车辆等地物上。为了生成数字高程模型 (DEM) 以及方便后续的地物提取和三维重建, 需要提取地面点, 这个从原始点云数据中去除非地面点的过程被称作为滤波。

由于地形的多样性和地物的复杂性, 滤波一直是 LIDAR 数据自动处理的难点和研究热点。已有许多学者提出了各种机载激光扫描数据滤波的算法, 国际摄影测量与遥感学会 (ISPRS) 专门对国际上具有代表性的几种滤波算法进行了详细的测试和评价^[1-2]。这些算法依据原理的不同, 可以归纳为基于不规则三角网 (TIN) 的方法、多层次的方法以及使用数学形态学的方法等。

滤波算法所依据的地学原理主要是以下两点:

一是地形曲面具有连续变化的特征, 在地物和地面过渡处的 LIDAR 点会发生高程突变, 虽然像陡坎这样的地形也会引起高程突变, 但只会发生在某个方向上; 二是地物的面积大小在一定范围内, 通常面积越大的地物平均高度也越大。

Vosseman 等使用 Delaunay 三角网组织数据, 并利用灰度级形态学中的腐蚀运算根据坡度去除非地面点^[3-4]。该算法首先使用训练样区确定滤波函数, 然后根据每个 LIDAR 点与周围点的距离和滤波函数判断该点是否为地面点。该算法的缺点是: 要找到合适的训练样区以获取滤波函数, 用来处理其他各种情况是比较困难的。Roggemo 和 Sithole 分别对 Vosseman 的方法进行了改进^[5-6], 通过构造一些新的复杂的滤波函数来改进算法的适应性。与 Vosseman 的方法不同, Zhang 提出一种渐进式形态学滤波的方法^[7]。该方法首先将原始 LIDAR 数据插值为规则格网, 再使用设定的初始结构元素进行形态学开运算, 并计算每点经过开运算后的高度值与原先高度值的差, 如果该高度差大于一定的阈值, 就为非地面点。逐渐增大结构元素的尺寸和相应的阈值, 反复进行上面的运算去除非地面点, 直到结构元素的尺寸大于最大的建筑物。这样反复进行开运算不仅需

要很大的计算量,而且容易误删除地面点。虽然可以对开运算前后的高度差设定阈值来判断是否为地面点,但此阈值的设定也是一个难点。

LIDAR点云的高程构成一个标量场,标量场的梯度是一个向量场。标量场中某一点上的梯度指向标量场增长最快的方向,梯度的长度是这个最大的变化率。因此可以用梯度来表示高程的突变程度,将其作为滤波运算的依据。据此,本文提出以形态学梯度为依据的机载激光扫描数据滤波方法,定义了适合于 LIDAR数据特点的形态学梯度计算方法和改进的形态学开运算。实验结果表明,这种方法具有较好的适应性和精度。

2 LIDAR点云数据的形态学梯度

由于 LIDAR点云数据量大且分布不规则,为了保持原始数据的精度且方便快捷查找邻域点,本文对原始数据进行格网划分,即根据点云范围按一定间距划分格网,确定每个网格内所包含的点,可能没有点,也可能有一个或多个点。在涉及邻域计算和形态学操作时,先找到相应的格网单元,然后取出其中所有的点分别进行运算和判断。

在数字图像处理中,基于规则分布的图像数据,常用小区域模板进行卷积来近似计算梯度,例如计算 $g(x, y)$ 的梯度,首先是求对于 x 和 y 的偏微分值 $P(x, y)$ 和 $Q(x, y)$, 如下:

$$P(x, y) \approx \frac{g(x, y+1) - g(x, y) + g(x+1, y+1) - g(x+1, y)}{2} \quad (1)$$

$$Q(x, y) \approx \frac{g(x, y) - g(x+1, y) + g(x, y+1) - g(x+1, y+1)}{2} \quad (2)$$

通过计算 2×2 邻域矩阵的平均有限差分,并作为 x 和 y 偏微分,得到图像梯度的幅度:

$$M(x, y) = \sqrt{P^2(x, y) + Q^2(x, y)} \quad (3)$$

由于机载 LIDAR数据的分布是不规则的,某一方向的邻域内可能没有点,也可能有多个点,难以用上面的方法计算梯度。所以采用具有对称结构元素的形态学梯度计算方法。

f 是待处理的数据, D 是 f 的定义域,结构元素 b 的大小为 $(2w+1) \times (2w+1)$, 则应用于 LIDAR点滤波的形态学运算定义为:对于三维坐标为 (x, y, z) 的激光点 p 经过膨胀运算 $\oplus b$ 后的高程是:

$$d_p = \max \{ f(x+i, y+j) \mid i \in [-w, w]; (x+i), (y+j) \in D_f \} \quad (4)$$

经过腐蚀运算 $\ominus b$ 后的高程是:

$$e_p = \min \{ f(x+i, y+j) \mid i \in [-w, w]; (x+i), (y+j) \in D_f \} \quad (5)$$

数学形态学的梯度通常定义为^[8]:

$$g = (\oplus b) - (\ominus b)$$

如果用上式计算 LIDAR点的梯度,则像图 1 中的 c 点和 d 点因为具有近似的梯度值而无法区分,而后面的计算需要根据梯度找出满足条件的位于地面的高程突变点,即 c 这样的点,所以本文使用的形态学梯度定义为:

$$g = (\oplus b) - f \quad (6)$$

即用 LIDAR点经过膨胀运算后的高程值减去原来的高程值得到该点的梯度。计算梯度所用的膨胀运算的结构元素大小为 3×3 。

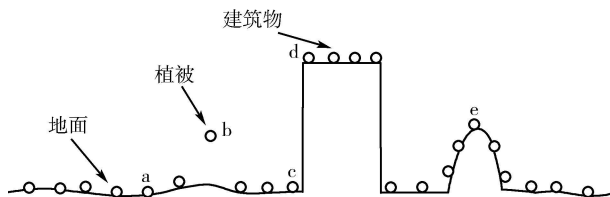


图 1 激光点分布示意图

Fig. 1 A profile of LIDAR points distribution

3 基于形态学梯度的滤波算法

3.1 根据梯度使用改进的开运算去除非地面点

用结构元素 b 对数据 f 进行开运算定义为:

$$f \ominus b = (\oplus b) \ominus b \quad (7)$$

通过开运算可以去掉比结构元素小的地物,如图 2 中的建筑物用 b_1 无法去除,只能用比其大的结构元素 b_2 去除。如果对整个点云进行开运算,不仅计算量大,而且容易误删除地面上发生起伏的点,如图 1 中的 e 点。其实在图 1 中的 a, c, e 点所做的开运算对滤波没有什么作用,因为它们处于地面上,开运算后的高程变化不大。又如图 2 中,结构元素 b_1 在建筑物内部(位置 3)所做的开运算和在地面上(位置 1)一样对滤波不起作用,因为运算后高程同样不会发生大的变化。

真正有希望达到滤波目的是 b_1 在位置 2, b_2 在位置 3 上所做的运算,即结构元素覆盖的范围有一部分在地面上,有一部分在地物上。也就是当结构元素在地物上移动时,至少需要覆盖一个地面上边界处的点,如图 1 中 c 点。

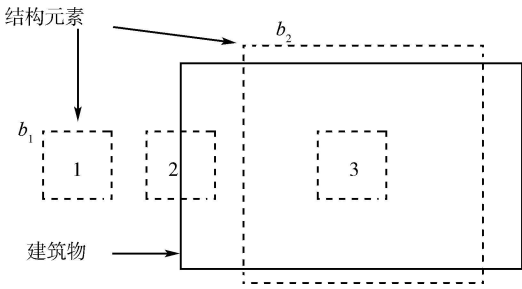


图 2 开运算
Fig.2 Opening operations

根据以上分析,本文采用一种基于形态学梯度的开运算去除非地面点,其中对构成开运算的腐蚀和膨胀重新定义,选择满足一定条件的点进行运算,故称为条件腐蚀和条件膨胀。

3.1.1 条件腐蚀

遍历点云数据,如果点 p 的梯度 g_p 大于一定的阈值 d_h ,即搜索到如图 1 中 c_i 这样的点,就用大小为 $(2w+1) \times (2w+1)$ 的结构元素对以 p 为中心的 w 邻域内的点做腐蚀。此处的腐蚀定义如下: p 点的坐标为 (x_p, y_p, z_p) , n 点的坐标为 (x_n, y_n, z_n) ,

若 $x_n \in [x_p - w, x_p + w], y_n \in [y_p - w, y_p + w]$, 且 $z_n > z_p$, 则 n 点经过腐蚀后的高程值为 $e_n = z_p$, 否则 $e_n = z_n$ 。

3.1.2 条件膨胀

对经过腐蚀后的数据用同样大小的结构元素做膨胀,即如果某点 p 腐蚀后高程 e_p 小于其原始高程 z_p ,则根据公式 (4) 对其进行膨胀,得到膨胀后的高程 d_p 。

计算每一点原始高程与膨胀后高程的差,如果该高程差大于阈值 d_h ,则该点就判断为非地面点。

3.1.3 迭代开运算

增大结构元素的尺寸 w 和阈值 d_h ,重复条件腐蚀和条件膨胀,直到 w 超过最大地物尺寸或者下面的条件满足:根据梯度直方图,可以知道梯度为 g 的点的个数 S_g ,如果满足公式 (8),则停止迭代。

$$\sum_{g>d_h} S_g < 8 \times w \tag{8}$$

该条件可以在高大地物较少且地形变化平缓的地区尽快结束迭代运算,因为面积为 $(2w+1) \times (2w+1)$ 的地物的边界网格数为 $8 \times w$ 。经过多次迭代开运算后,面积小于 $(2w+1) \times (2w+1)$ 的地物已经被滤除了,如果还存在面积大于 $(2w+1) \times (2w+1)$ 的地物,则与其边界邻近处大于 d_h 梯度的点的个数必然大于 $8 \times w$,反之则不存在更大的地物,也就没有必要继续增大结构元素进行迭代了。

3.2 格网划分的间距选择

对原始数据进行格网划分需要确定格网的间距,如果间距过小,难以查找邻域点;如果间距过大,每个网格内包含点过多难以确定相关性;所以需要有一个合适的格网间距。LIDAR 是按一定频率发射激光脉冲,故可求得近似点间距 Point Spacing 据此划分格网是一个较好的选择。

3.3 阈值的选择和步长的设置

形态学迭代运算中逐渐增大结构元素的尺寸 w 和阈值 d_h 通常有两种方式:一是 w 按一定步长增大, d_h 以某一函数关系 $f(w)$ 相应增大;二是 d_h 按一定步长增大, w 以某一函数关系 $g(d_h)$ 相应增大。因为地物可以按高度分为多个连续的层次,每个层次地物的面积又在一定的范围内,随着高度的增大,地物的最大尺寸也相应增大,所以可以选择第二种方式,让 d_h 以一定的步长线性增大: $d_h = 1, 2, 3, \dots$ 。

同时使相应的结构元素 w 大于高度在 $(d_h, d_h + 1)$ 范围内的最大地物尺寸。所以 w 按下式相应增大:

$$w = \frac{4 \times d_h}{\text{point Spacing}}$$

3.4 去除极低粗差点

极低粗差点是由系统误差造成,会影响 DEM 生成的效果。这种点在点云中往往是孤立存在的,且高程远小于周围的点。通过以下步骤可以去除极低粗差点。

- (1)在点云中寻找梯度大于一定阈值的点。
- (2)判断该点的 8 个邻域内其他点的高程是否远大于该点,如果是,则该点就为极低粗差点。

4 实验结果

为了检验算法的稳定性和可行性,本文实验采用 ISPRS 提供的专门用于滤波算法测试的 15 个样本数据^[1]。这些样本数据主要包括了不同地理环境中滤波可能遇到困难的情况,如粗差点的影响、复杂的地物、地物与地面相连、斜坡上或低矮的植被、地形的不连续等^[1]。使用本文算法对这 15 个样本数据做滤波实验,并对实验结果进行了定性和定量分析。

4.1 定性分析

按照 ISPRS 对各种滤波算法的定性评价方法,对滤波后的结果进行可视化分析 (图 3 是对编号

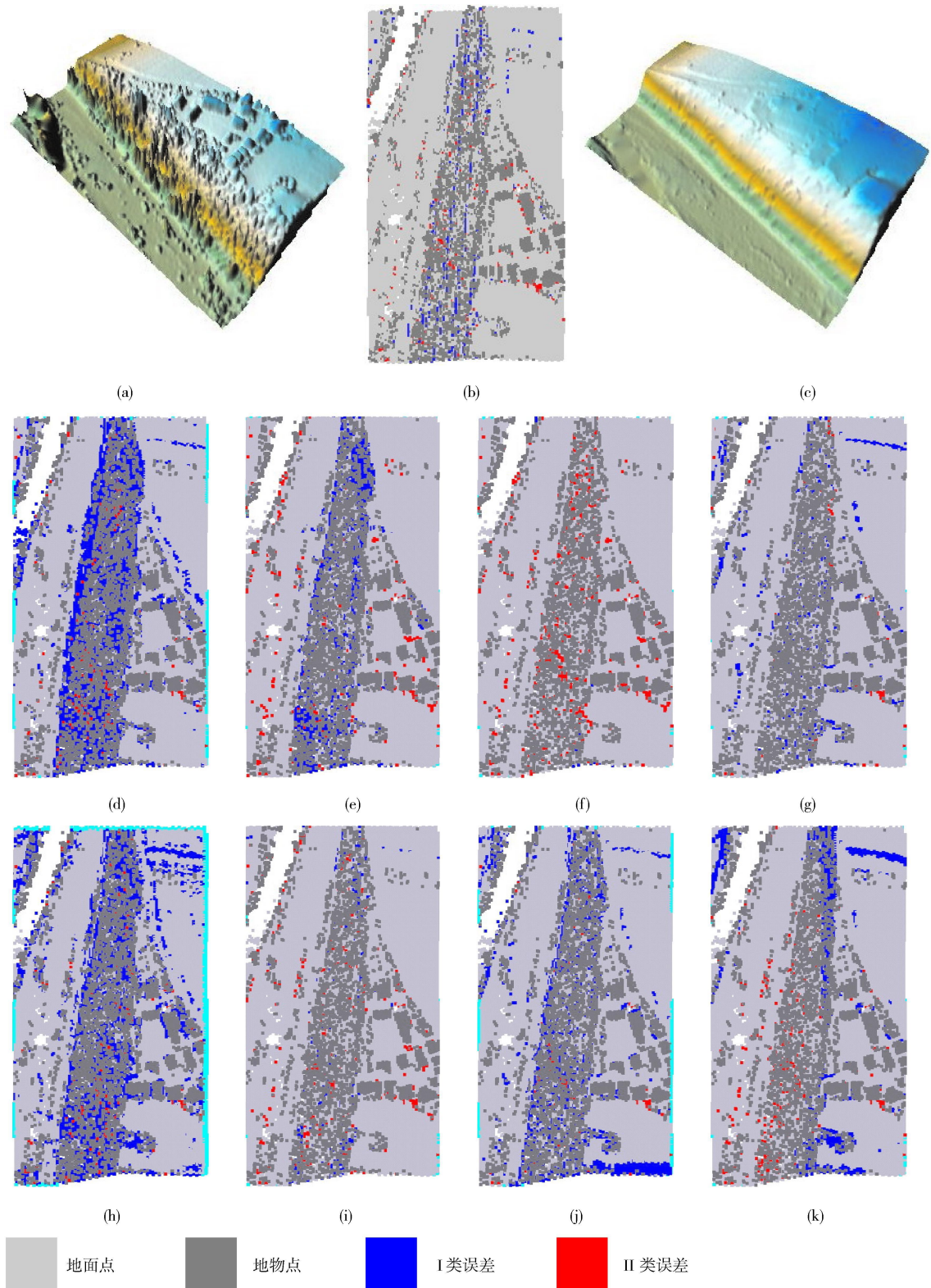


图 3 滤波结果的可视化分析

(a) DSM; (b)本文方法滤波结果; (c)本文方法滤波后构建的 DEM; (d) Elmquist算法滤波结果; (e) Sohn算法滤波结果; (f) Axelsson算法滤波结果; (g) Pfeifer et al 算法滤波结果; (h) Brovelli算法滤波结果; (i) Roggero算法滤波结果; (j) Wack/Wimmer算法滤波结果; (k) Sithole/Vossmann算法滤波结果

Fig. 3 Visual analysis of filtering results

为 51 的样本数据的处理与对比分析), 表 1 是 ISPRS 的评价标准, 表 2 是本文算法的分析结果。

表 1 定性分析的等级
Table 1 Rating of qualitative analysis

等级	滤波效果评估	对邻域点的影响
好	大部分情况下能将 90%以上的对象滤除	没有影响
中	少数情况下不能将对象滤除	对邻域点的滤波影响较小
差	大部分情况下只能将少于 50%的对象滤除	对邻域点的滤波影响较大

表 2 定性分析
Table 2 Qualitative analysis

粗差点		与地面相连的地物	
极高粗差点	好	斜坡上的建筑物	好
极高粗差点对邻域的影响	好	桥梁	好
极低粗差点	好	坡道	大部分情况下被滤除
极低粗差点对邻域的影响	好		
复杂地物		植被	
地物总的滤除情况	好	植被总的滤除情况	好
非常大的地物	好	斜坡上的植被	好
非常小的地物	好	低矮植被	好
形状和结构复杂的地物	中	地面的不连续特征	
非常低矮的地物	中	不连续特征的保持	较好保持
将地面分割开来的地物 (如庭院)	好	陡峭的山脊	较好保持

从表 2 中可以看出本文滤波方法面对各种情况整体表现稳定良好。粗差点的影响极小, 可以滤除大部分地物, 包括墙、车辆、桥梁和复杂的建筑物等, 并能有效地滤除斜坡上或低矮的植被。但是对于非常低矮的且面积较大的地物却无能为力, 因为这与面积越大的地物通常也越高的规律相悖, 当然这种地物很少。坡道是连接不连续地面 (如陡坎) 的部分, 其两侧都高于周围的地面, 在点云中与桥梁很相似, 所以常常被当作桥梁去除了。与文献 [1] 中其他方法相比, 多数情况下本文方法能较好地保留地面特征, 但是当遇到很陡的斜坡, 且斜坡上又有建筑物或植被时, 在滤除建筑物和植被的同时, 也会误删除一些地面点。

4.2 定量分析

设 S_1 为地面点总数, S_2 为地物点总数, E_1 是被错误判断为地物点的地面点个数, E_2 是被错误判断为地面点的地物点个数, 定量分析滤波算法常常比较三类误差, 即 I 类误差 E_1 / S_1 、II 类误差 E_2 / S_2 、总误差 $(E_1 + E_2) / (S_1 + S_2)$ 。

根据这三类误差, 将本文方法与 ISPRS 提供的 8 种典型滤波算法的测试结果进行了对比 (图 4)。

ISPRS 报告^[1]显示有些滤波算法偏重于降低 II 类误差, 而 I 类误差却很大 (如 Roggero 算法和 Sithole 算法)。但 ISPRS 报告认为更应该侧重减小 I 类误差, 因为在质量控制中, 需要人工修改错误, 而修改 II 类误差比修改 I 类误差容易得多^[1]。

本文认为应该同时尽可能地减小 I 类误差和 II 类误差, 这样在 DEM 精度要求不是很高的时候可以实现自动生产 DEM, 当 DEM 精度要求很高时又可以方便人工修改进行质量控制。实验结果表明本文滤波算法对环境的适应能力强, 不论是在地物复杂的城市地区, 还是在地势起伏较大、植被分布密集的郊外, 都能将 I 类误差、II 类误差和总误差同时控制在比较小的范围内, 如图 4。将使用对称结构元素的形态学梯度计算方法引入到点云梯度的计算中来, 并将其作为选择特定点进行运算的依据, 不仅可以减少不必要的计算, 还可以有效地降低误差产生的可能。

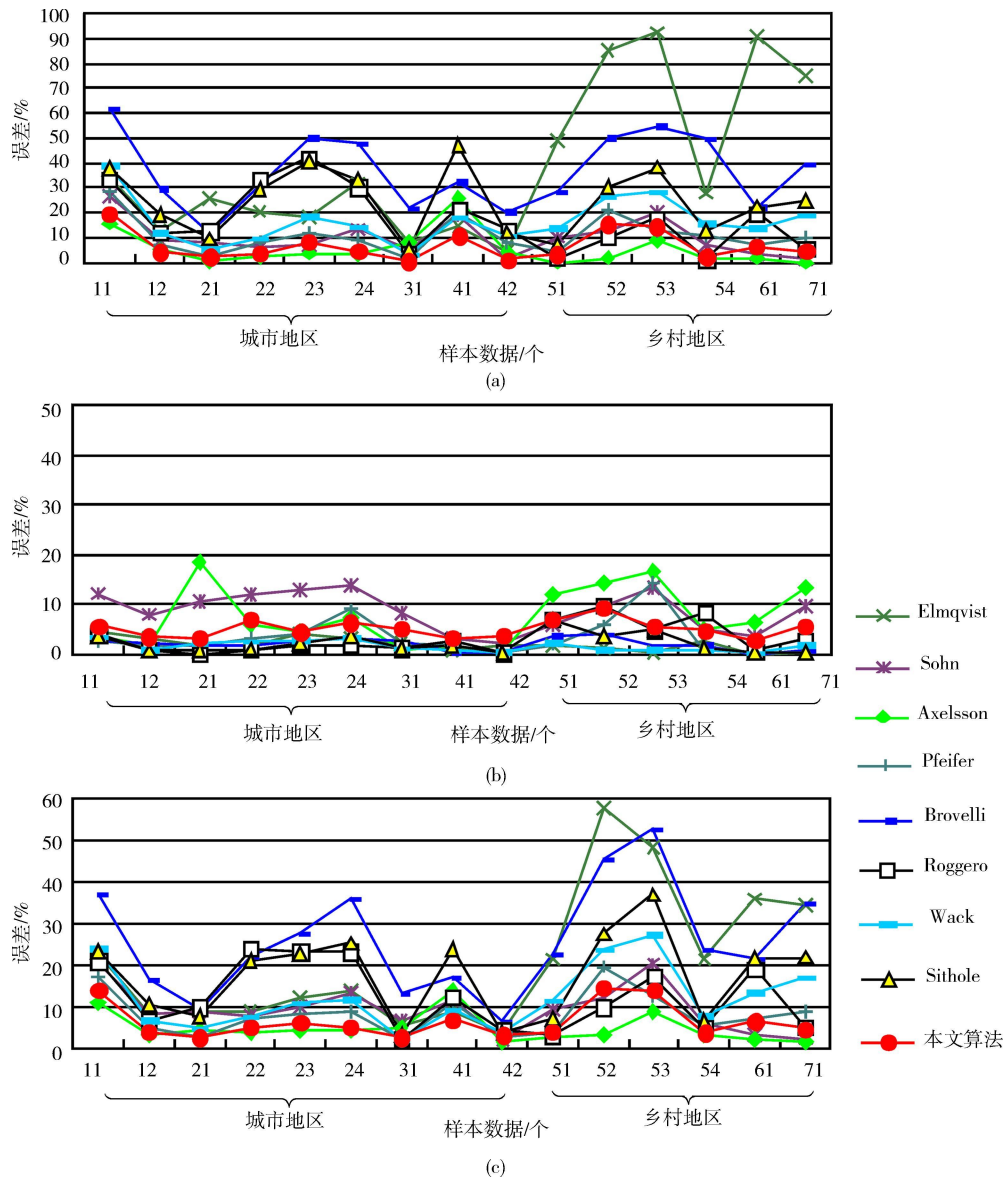


图 4 滤波算法比较
(a) I 类误差; (b) II 类误差; (c) 总误差
Fig.4 Comparison of filtering algorithms
(a) Type I error (b) Type II error (c) Total error

5 结 论

针对 LDAR 数据点云的特点和滤波所面临的问题,本文提出了一种基于形态学梯度的机载激光扫描数据滤波的新方法。该算法先对原始数据进行网格划分,然后用适合于判断的形态学梯度计算方法得到每一点的梯度,再据此去除极低粗差点,最后采用基于梯度的改进的开运算选择特定点进行迭代运算,并根据梯度直方图减少迭代的次数,通过判断每次开运算后点的高程与原高程的差值是否小于一定的阈值,逐步滤除非地面点。用本文

算法对 ISPRS 提供的专门用于滤波算法测试的数据进行实验,结果表明该算法对各种复杂的地理环境有很强的适应性,既能有效地去除非地面点,又能尽量保留地面点,使得各项误差都控制在较小的范围内,从而具有良好的可靠性与实用性。

参考文献 (References)

[1] George Sithole George Vosselman The full Report ISPRS Comparison of Filters [R]. <http://www.itc.nl/isprswgIII-3/filtertest/>, 2003.
[2] George Sithole George Vosselman Experimental Comparison of Filter Algorithms for Bare-Earth Extraction from Airborne Laser Scanning Point Clouds [J]. ISPRS Journal of Photogrammetry &

- Remote Sensing 2004, **59**: 85–101.
- [3] Vossehan G. Slope Based Filtering of Laser Altimetry Data [J]. International Archives of the Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences 2000, **33**: 935–942.
- [4] Vossehan G, Maas H. Adjustment and Filtering of Raw Laser Altimetry Data [A]. Proceedings of OOEPE Workshop on Airborne Laser Scanning and interferometric SAR for Detailed Digital Elevation Models [C]. 2001.
- [5] Roggero M. Airborne Laser Scanning. Clustering in Raw Data [J]. International Archives of the Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences 2001, **34**: 227–232.
- [6] Sithole G. Filtering of Laser Altimetry Data Using a Slope Adaptive Filter [J]. International Archives of the Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences 2001, **34**: 203–210.
- [7] Zhang K Q, Chen S C, Dean Whiman et al. A Progressive Morphological Filter for Removing Nonground Measurements From Airborne LIDAR Data [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing 2003, **41**(4): 872–882.
- [8] Rafael C Gonzalez, Richard E Woods. Digital Image Processing (Second Edition) [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2003. [冈萨雷斯. 数字图像处理 (第二版) [M]. 北京: 电子工业出版社, 2003.]

Filtering Airborne LIDAR Data Based on Morphological Gradient

LI Yong WU Hua-yi

(State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying Mapping and Remote Sensing Wuhan University Hubei Wuhan 430079, China)

Abstract The technology of airborne Light Detection And Ranging (LIDAR) receives wider attention and broader application for the ability of rapid acquiring three-dimensional topographic measurements of large-scale areas. These measurements are three-dimensional point clouds with irregular spacing. The points include bare ground, buildings, vehicles, vegetation and so on. It is important to identify and classify ground and non-ground points for generating DEM and extracting objects. Removing non-ground points from LIDAR datasets is called as filtering.

In the last few years, a number of filtering algorithms have been explored. But most algorithms have more or less drawbacks and limitation in adaptability and correctness. Filtering is still a challenging task that is difficult to resolve for scene complexity. The topographic theory that filtering lies on are generally two aspects, one is that the natural terrain has continuity; the other is that the size of objects often has a range. Filtering based on mathematical morphology is considered as a promising strategy because it combines the two above aspects. But most of researchers carry on erosion or opening operation using every point, which is time-consuming and often cause errors.

In order to overcome the weakness mentioned above, a new method of filtering based on morphological gradient is proposed in this paper. The method mainly analyzes the distribution characteristic of LIDAR points according to morphological gradients, so as to choose the specific points to carry on the morphological operation, which mainly include following steps. Firstly, point clouds are divided by an index mesh, which can organize points effectively and maintain the high resolution potential of raw data. Then, the morphological gradient of each point is calculated using the method suitable for filtering, and the low outliers are removed. Finally, some points are chosen based on gradients to carry on an improved opening operation iteratively. The iterative times are controlled through analyzing the gradient histogram. During each time of iteration, a point is classified as an object point if its difference of the height after opening operation and the original height is more than a threshold.

15 sample data sets are released by ISPRS especially for testing of filtering algorithms, mainly including situations when difficulties are encountered in different geographical environments, such as outliers, object complexity, attached objects, vegetation and discontinuities in the bare ground. The semi-automatic filtering and manual editing of sample data have been done by ISPRS, whose results are used to evaluate result of automatic algorithms. ISPRS also publish the test results and analysis of eight typical filtering algorithms. The method proposed in this paper is tested with the sample data and compared with other filtering methods qualitatively and quantitatively. Qualitative assessment is done by visual representation of filtering results. Quantitative assessment is done by evaluating Type I error (rejection of bare ground points), Type II error (acceptance of object points as bare ground) and Total error.

The experimental results show that the method has high robustness in all kinds of complex scenes. The filter based on morphological gradient can reduce the nonessential computation as well as the possibility that errors happen. All types of error are controlled simultaneously in a relatively small range. The topographic features are well preserved while object points are removed effectively. So the method has good reliability and practicability.

Key words LIDAR; filtering; airborne laser scanning; morphological gradient