

基于改进的渐进多尺度数学形态学的激光雷达 数据滤波方法

赵明波^{1,2} 何 峻¹ 田军生³ 付 强¹

¹ 国防科技大学电子科学与工程学院自动目标识别重点实验室, 湖南 长沙 410073
² 中国人民解放军 93246 部队, 吉林 长春 130051
³ 空军装备研究院雷达与电子对抗研究所, 北京 100085

摘要 激光雷达点云数据的滤波处理是激光雷达数据处理的基础和至关重要的步骤, 基于数学形态学的滤波算法应用广泛。针对现有基于数学形态学的滤波算法在处理包含大面积空白区域的点云数据时遇到的问题, 提出了一种改进的渐进多尺度数学形态学滤波算法, 通过改进形态开运算来处理空白区域。根据数学形态学滤波的基本原理, 证明了改进形态开运算的可行性。详细阐述了所提算法的基本步骤及流程, 并分析了其性能特点。利用仿真数据和公开测试数据, 对所提算法进行了实验验证。实验结果表明, 所提算法对存在大面积空白区域的点云数据具有良好的滤波性能; 与其他典型滤波算法相比, 滤波性能更优。

关键词 遥感; 激光雷达数据滤波; 数学形态学; 数字高程模型; 点云数据; 图像处理

中图分类号 P228 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS201333.0328001

Ladar Data Filtering Method Based on Improved Progressive Multi-Scale Mathematic Morphology

Zhao Mingbo^{1,2} He Jun¹ Tian Junsheng³ Fu Qiang¹

¹ Automatic Target Recognition Key Laboratory, School of Electronic Science and Engineering,
National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China

² No.93246 Troop, People's Liberation Army, Changchun, Jilin 130051, China

³ Radar and Electronic Countermeasures Institute, Air Force Equipment Academy, Beijing 100085, China

Abstract Ladar point-cloud data filtering is basis and critical steps of the ladar data processing. Filtering algorithm based on mathematical morphology is applied widely. But the existing filtering algorithms have some problems when processing point-cloud data which contains some blank region of large area. To solve these problems, an improved progressive multi-scale mathematical morphology filtering algorithm is proposed. It deals with the blank region by improving morphological opening operation. According to basic principles of mathematical morphology, feasibility of improved morphological opening operation is proved. Then basic steps of the proposed algorithm are elaborated, and performance characteristics are analyzed. The proposed algorithm is verified experimentally by using simulation data and public test data. Experimental results show that the proposed algorithm can perfectly filter point-cloud data which contains some blank region of large area, and it has better filtering performance compared with other representative filtering algorithm in most cases.

Key words remote sensing; laser radar data filtering; mathematical morphology; digital elevation model; point-cloud data; image processing

OCIS codes 280.3640; 100.6890; 100.3008; 100.4997; 150.6910

收稿日期: 2012-10-24; **收到修改稿日期:** 2012-11-15

作者简介: 赵明波(1983—), 男, 博士研究生, 主要从事精确制导与目标识别、激光雷达图像处理、目标检测与识别等方面的研究。E-mail: zhmb831019@163.com

导师简介: 付 强(1962—), 男, 博士, 教授, 主要从事精确制导与目标识别、雷达信号处理等方面的研究。
E-mail: fuqiang1962@vip.sina.com

1 引 言

空地观测获得的激光雷达数据是涵盖地面和地物的一系列不规则分布的三维点云数据,如何从大量数据中分别过滤出地面点和地物点,并进行各种地物的分类和识别已经成为近几年来激光雷达数据处理的研究主题。该项工作不仅是生成数字高程模型(DEM)和数字表面模型(DSM)等数字地形产品及数字三维城市重建的基础^[1~4],同时也是战场侦察、精确打击等军事领域实现目标检测、识别过程中激光雷达数据处理的重要组成部分^[5~7]。其中激光雷达数据滤波指的是如何实现地面点的提取与地物点的剔除。

由于地物的复杂性和地形的多样性,滤波一直是激光雷达数据自动处理的难点和研究热点。早在2003年国际摄影测量与遥感学会(ISPRS)就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^[8,9]。Sithole等^[8,9]根据不同滤波算法对地面数据点的局部邻域结构的假设条件不同,把滤波算法分为基于坡度变化的算法、平面拟合的算法、曲面拟合的算法和基于聚类及分割的算法。Meng等^[10]对当前主要的激光雷达数据滤波算法也进行了较为全面的总结,并从数据回波数量和类型、预处理步骤、输入数据格式、迭代特性、邻域定义以及关键参数设置这6个重要方面出发,把它们分为6大类,分别是:基于分割和聚类的算法、基于形态学的算法、方向扫描法、基于轮廓的算法、基于不规则三角网(TIN)的算法和基于插值的算法。基于数学形态学的滤波方法是一种自下而上、从局部出发扩展到全局的滤波方法^[11]。由于被树木、汽车和建筑物等地物反射的激光点云数据的高程值通常比相邻地面点要高,在点云数据高度信息生成的二维灰度图像中,较高地物上的点云数据可通过灰度值的突变来识别。基于集合运算组合的数学形态学方法可以识别灰度图像上的突变特征,利用形态学开运算剔除高于地面的点,得到逼近实际地形的DEM。基于数学形态学的滤波方法的一个突出优势就是可以充分利用一些处理灰度图像的形态学算法和工具,其简单易实现,计算效率较高;如果能根据实际场景特性设置较为合适的参数,可以获得较好的滤波效果。众多学者对基于数学形态学滤波方法的研究和实验也验证了这一点。

本文阐述基于数学形态学的滤波方法的基本原理和发展概况,详细分析了处理存在大面积空白区域的激光雷达点云数据时存在的问题。针对存在问

题,通过改进形态开运算来解决,提出一种改进的渐进多尺度数学形态学的激光雷达数据滤波方法,详细阐述所提算法的基本步骤和流程并分析其性能特点。利用仿真数据和ISPRS公布的公开测试数据对所提算法进行实验验证,验证所提算法的有效性和与其他算法相比的滤波性能。

2 数学形态学的滤波方法

2.1 数学形态学基本原理

腐蚀和膨胀运算是基于数学形态学的图像处理算法的基础,针对灰度图像的腐蚀和膨胀运算是在结构元素定义的邻域内选择图像像素值和结构元素作用后的最小或最大像素值。因此,在激光雷达点云数据高度信息生成的格网化DSM中,腐蚀和膨胀运算分别定义为

$$Z_c(i, j) = (Z \otimes g)(i, j) = \min_{(s, t) \in \omega} [Z(s, t)], \quad (1)$$

$$Z_d(i, j) = (Z \oplus g)(i, j) = \max_{(s, t) \in \omega} [Z(s, t)], \quad (2)$$

式中 Z 为格网化DSM; g 为结构元素, $Z \otimes g$ 为腐蚀运算, $Z \oplus g$ 为膨胀运算, $Z_c(i, j)$ 、 $Z_d(i, j)$ 分别为腐蚀、膨胀运算后格网化DSM中索引为 (i, j) 的网格高程值, ω 为结构元素对应的窗口大小。组合腐蚀和膨胀运算,形成开运算:

$$(Z \circ g)(i, j) = [(Z \otimes g) \oplus g](i, j), \quad (3)$$

式中 $Z \circ g$ 为开运算,对格网化DSM先执行腐蚀运算,再进行膨胀运算。开运算能在保留比结构元素窗口尺寸大的物体的同时,去除比结构元素窗口尺寸小的物体,在激光雷达数据滤波领域得到了广泛应用^[12]。

2.2 发展概况

基于数学形态学的滤波方法能否成功的关键在于结构元素窗口大小的选择和测区内地物的分布情况。如果结构元素窗口大小选择恰当,通过一次开运算即可滤掉所有的非地面点,获取地面点集,得到DEM。然而,利用一个固定窗口大小的结构元素很难移除各种不同尺寸的非地面物体,如果窗口过小,则只有小的非地面物体(比如车或树木)被滤除,而大型地物(建筑物等)难以被滤除;如果窗口过大,容易造成地面起伏被平滑,丢失地形细节。理想的情况是,窗口尺寸应该足够小,以保留所有的地面细节;同时,窗口还应该足够大,以去掉所有的地物点。显然,这种窗口是不存在的。

为了解决上述问题,Kilian等^[13]提出从最小窗口尺寸开始,使用不同大小的窗口对数据进行滤波;

每次滤波结果根据窗口大小给予一定的权重,窗口越大,权重越高;最终,根据每个点的权重插值确定DEM。Zhang等^[14]提出了一种渐进多尺度形态学滤波算法,通过逐渐增大开运算窗口尺寸和高差阈值的方法,对点云数据进行判别,最终能够得到分类正确率较高的地面点和非地面点,数据处理流程如图1所示^[14];通过与扩展窗口高程阈值滤波算法(ETEW)和最大局部坡度滤波算法(MLS)两种算法的分析比较^[15],验证了所提算法的优良性能,其不仅具有最小的错误分类概率,还具有较好的地物边缘保护能力。虽然渐进多尺度形态学滤波算法中,窗口尺寸以及高差阈值的选择也需要对实验区域的地形和地物特征进行分析得到,但该算法综合运用多尺度窗口和随窗口大小变化而设定高差阈值的思想,在基于数学形态学的激光雷达数据滤波方法发展中具有里程碑式的意义,以后发展的很多算法都是基于这种基本算法改进而来的。罗伊萍等^[11,16]针对在应用渐进多尺度数学形态学滤波方法中存在的问题,根据不同场景数据,分别从自适应确定坡度系数和滤波后误分类点的质量控制两个方面提出了改进算法,实验结果表明滤波效果较好。Chen等^[17]针对文献[14]中算法用单个固定坡度系数来处理整个场景的缺陷,不再简单地用前后两次开运算的高程差来判断是地面点还是非地面点,而是根据前后两次开运算的高程差在地物处变化陡峭、在地面处变化较缓的特点来判断,解决了较大窗

口条件下出现地形过度平滑的问题,可以较好地保留地面细节;但计算也更加繁琐,需要设置的参数更多,较适用于建筑物较多区域,且并没有跳出渐进多尺度形态学滤波算法的框架。

2.3 存在的问题

基于渐进多尺度数学形态学的滤波算法及其改进算法虽然在大部分条件下能够较好地滤除非地面点,获得地面点和DEM,但在算法的实际应用中,还存在一些问题。由于基于数学形态学的滤波算法是以二维灰度图像处理算法中的形态学方法为基础的,因此一般要求在执行滤波算法前,根据原始激光雷达点云数据生成格网化DSM。生成格网化DSM的主要方法是根据观测区域大小及数据分辨率构建水平网格,并获取每个网格内的点云数据,取这些点云数据的最小高程值作为对应网格的高程值,由该水平网格和每个网格内的最小高程值构成的二维矩阵即是格网化DSM;但对于不存在点云数据的网格(即空白区域)的高程值则需要通过相邻网格进行插值估计。空白区域主要是由于激光雷达观测视角因素(观测区域边缘部分)、水体对激光的吸收效应(无回波信号)以及较高地物(树木植被、高大建筑物等)的遮挡等因素造成的,其面积大小不一。对于面积较小的空白区域来说,用普通的最近邻法或反距离加权法等插值算法^[12,18]就可以得到较好的估计值;但对于面积较大的空白区域数据来说,会带来较大误差,严重影响滤波效果。主要体现在:1)空白区域较多且面积较大时,对其进行高程值估计需要耗费大量的计算资源;2)较大的空白区域与观测数据之间连接区域较小,难以有效准确地估计高程值;3)对于地物与地面连接处的空白区域,估计得到的高程值可能严重偏离实际值,甚至在地面与地物之间形成连接斜面,给后面的滤波带来困难,滤波结果中可能出现虚假地面;4)对于地形起伏较大区域的空白区域,估计得到的高程值容易出现断裂面,滤波结果中会出现虚假地物,即把较多的地面数据误判为地物;5)空白区域较多时,难以分别判断各个空白区域是由哪种原因造成的,不同原因造成的空白区域理论上应该是用不同插值方法来估计高程值的,插值方法的应用不当也会带来较大误差。

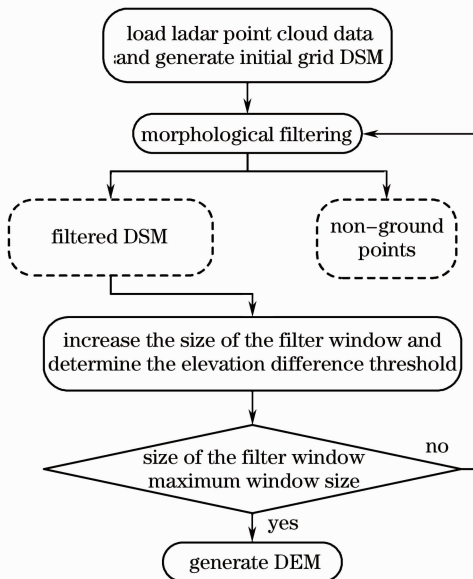


图1 基于渐进多尺度数学形态学的滤波算法流程图
Fig.1 Flow chart filtering algorithm based on of the progressive multi-scale mathematical morphology

3 改进的渐进多尺度数学形态学的滤波方法

基于数学形态学的滤波算法的核心是形态开运

算,针对在传统的基于数学形态学的滤波算法中的格网化 DSM 生成过程中空白区域高程插值估计和填充时存在的问题,这里将通过改进形态开运算对未填补空白区域的格网化 DSM(LDSM)进行处理,并分析对于 LDSM,如何应用处理二维图像的形态学运算工具,及是否会影响形态开运算结果;进而给出改进算法的基本步骤和流程,并分析改进后算法的性能特点。

3.1 改进的形态开运算

对于 LDSM,是无法直接用处理二维图像的形态学运算工具进行操作的,因为空白区域的存在无法有效进行矩阵运算。形态开运算分为两个步骤,1)对格网化 DSM 按照设定的结构元素进行腐蚀运算,2)进行膨胀运算,得到开运算后的 DSM。如(1)式所示的腐蚀运算是取当前网格邻域内的最小值,如果把当前网格邻域内的空白区域的高程值用整个 LDSM 中的最大高程值替代,再用形态学运算工具进行处理,那么非空白区域的腐蚀运算结果将不会改变;同理,如(2)式所示的膨胀运算是取当前网格邻域内的最大值,如果把当前网格邻域内的空白区域的高程值用整个 LDSM 中的最小高程值替代,同样不会影响非空白区域的膨胀运算结果。下面用 3×3 邻域的正方形结构元素为例,证明对于 LDSM,通过改进形态开运算同样可以用形态学运算工具进行处理,并且不影响形态运算结果。

假设 LDSM 中某一网格 $Z(i, j)$ 即 z_{33} 的 5×5 邻域如图 2 所示(图中圆圈表示空白区域),整个 LDSM 的高程最大值为 z_{\max} 。当执行腐蚀运算时,先用 z_{\max} 填充图 2 中的空白区域,则应用形态学运算工具得到的 z_{33} 的 3×3 邻域腐蚀运算结果为

$$\text{erode}(z_{33}) = \min \begin{pmatrix} z_{22} & z_{\max} & z_{24} \\ z_{32} & z_{33} & z_{\max} \\ z_{\max} & z_{43} & z_{44} \end{pmatrix}, \quad (4)$$

式中 $\text{erode}()$ 为形态学运算工具中的腐蚀运算函数, $\min()$ 为求最小值运算。由于 z_{22} 、 z_{24} 、 z_{32} 、 z_{33} 、 z_{43} 、 z_{44} 均小于等于 z_{\max} , 所以

$$\text{erode}(z_{33}) = \min(z_{22}, z_{24}, z_{32}, z_{33}, z_{43}, z_{44}), \quad (5)$$

(5)式证明了用形态学运算工具得到的腐蚀运算结果与 z_{33} 的 3×3 邻域中存在数据点的网格的高程最小值相同,即上述操作并没有改变其腐蚀运算结果,并设 $\text{erode}(z_{33}) = z_{33_{\min}}$ 。同理可以得到其他存在数据点的网格的腐蚀运算结果如图 3 所示。

假设整个 LDSM 的腐蚀运算结果的最小值为

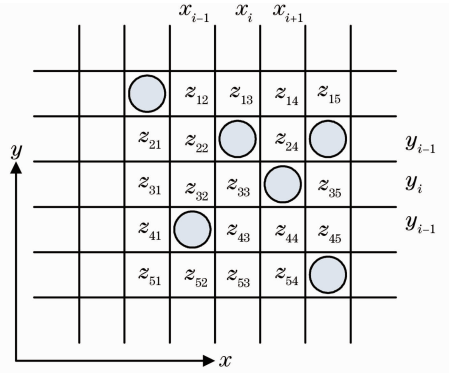


图 2 LDSM 中某一网格 $Z(i, j)$ 的 5×5 邻域
Fig. 2 5×5 neighborhood of some grid $Z(i, j)$ in the LDSM

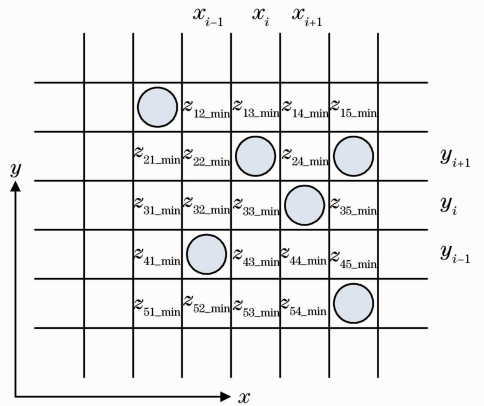


图 3 中各个网格的腐蚀运算结果

Fig. 3 Erosion results of each grid in Fig. 2

$z_{e_{\min}}$, 当执行膨胀运算时,先用 $z_{e_{\min}}$ 填充图 3 中的空白区域,则应用形态学运算工具得到的 $z_{33_{\min}}$ 的 3×3 邻域膨胀运算结果为

$$\text{dilate}(z_{33_{\min}}) = \max \begin{pmatrix} z_{22_{\min}} & z_{e_{\min}} & z_{24_{\min}} \\ z_{32_{\min}} & z_{33_{\min}} & z_{e_{\min}} \\ z_{e_{\min}} & z_{43_{\min}} & z_{44_{\min}} \end{pmatrix}, \quad (6)$$

式中 $\text{dilate}()$ 为形态学运算工具中的膨胀运算函数, $\max()$ 为求最大值运算。由于 $z_{22_{\min}}$ 、 $z_{24_{\min}}$ 、 $z_{32_{\min}}$ 、 $z_{33_{\min}}$ 、 $z_{43_{\min}}$ 、 $z_{44_{\min}}$ 均大于等于 $z_{e_{\min}}$, 所以

$$\text{dilate}(z_{33_{\min}}) = \max(z_{22_{\min}}, z_{24_{\min}}, z_{32_{\min}}, z_{33_{\min}}, z_{43_{\min}}, z_{44_{\min}}). \quad (7)$$

(7)式证明了用形态学运算工具得到的膨胀运算结果与 $z_{33_{\min}}$ 的 3×3 邻域中存在数据点的网格的高程最大值(腐蚀运算后)相同,即上述操作并没有改变其膨胀运算结果。

组合上述操作,即为改进后的形态开运算(具体步骤参见 3.2 节的 Step 3)。可见对于 LDSM,其同样可以用形态学运算工具进行处理,并且不影响形

态运算结果。

3.2 基本步骤及流程

结合图 1 中原始渐进多尺度数学形态学滤波方法的基本原理流程,根据对该算法的改进,给出改进后的渐进多尺度数学形态学滤波方法的基本步骤和流程。流程图如图 4 所示,基本步骤如下:

Step 1:数据格网化。对原始激光雷达三维点云数据进行格网化,并分别记录每个网格中的所有数据点、高程最低点(初始格网化 DSM)及是否存在数据点的网格标志矩阵(GFM,存在数据点为 1,不存在数据点为 0);剔除初始格网化 DSM 中的粗差,得到更新后的格网化 DSM 和 GFM。注意,这里不填充格网化 DSM 中的空白区域,即得到的是 LDSM。

Step 2:参数设置。把 LDSM 和 GFM 输入到形态滤波算法中;并设定相关参数,主要有:最大窗口尺寸(或直接输入最大迭代次数 M),窗口尺寸增长方式,坡度系数 s ,初始高差阈值 h_0 ,最大高差阈值 h_{\max} 。

为避免窗口尺寸线性增长方式执行效率低和指数增长方式不利于地形细节的保护和矮小地物的剔除等方面的缺陷,兼顾算法执行效率和滤波性能,对原始算法进行改进,采用混合增长方式,即在窗口尺寸较小时采用线性增长方式,保持较小的高差阈值和窗口递增速度;窗口尺寸较大时采用指数增长方式,使用较大的高差阈值和窗口递增速度。根据实际场景中的地形细节和地物分布情况,设置窗口增长方式的迭代次数转换阈值 k_{thr} ,当 $k \leq k_{\text{thr}}$ 时,采用

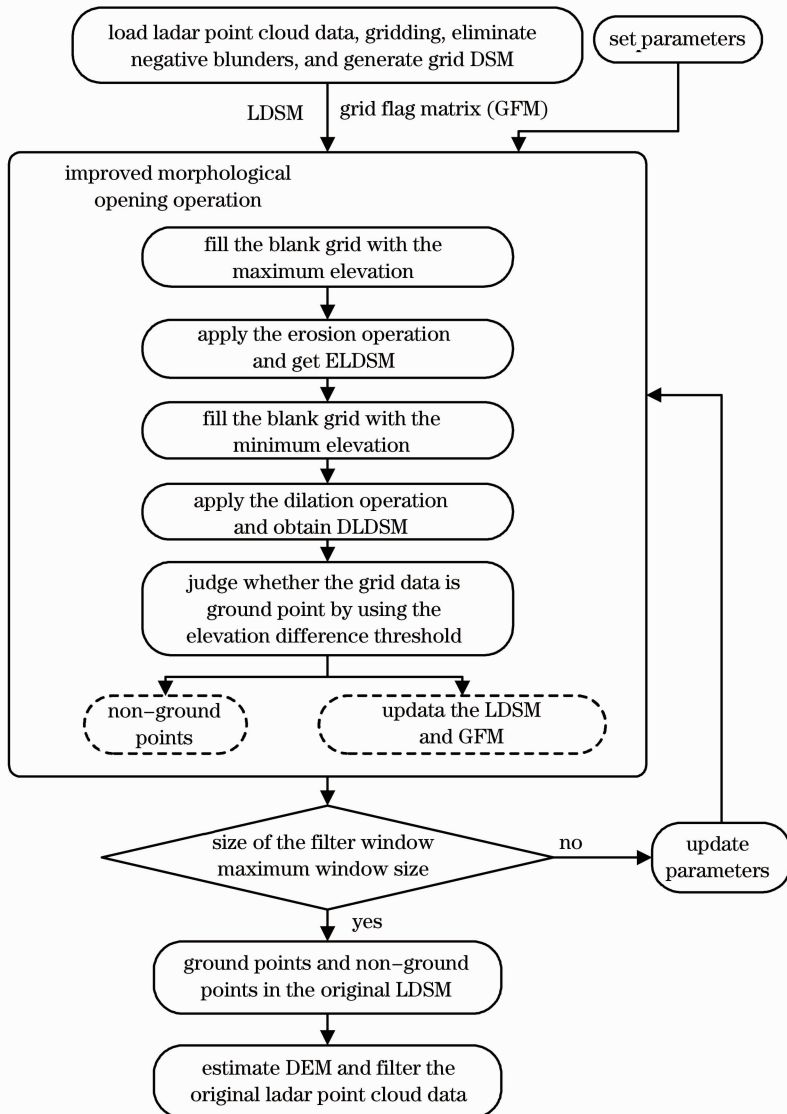


图 4 改进的渐进多尺度数学形态学滤波方法基本流程图

Fig. 4 Basic flow chart of the improved progressive multi-scale mathematic morphological filtering method

线性增长方式;当 $k > k_{\text{thr}}$ 时,采用指数增长方式,即

$$\omega_k = \begin{cases} 2b_1k + 1, & k \leq k_{\text{thr}}, b_1 = 1 \\ 2b_2^{k-k_{\text{thr}}} + \omega_{k_{\text{thr}}}, & k > k_{\text{thr}}, b_2 = 2 \end{cases} \quad (8)$$

式中 $k = 1, 2, \dots, M$, 为算法迭代次数; ω_k 为随迭代次数变化的窗口尺寸, b_1, b_2 分别为线性增长方式和指数增长方式的基数。

Step 3: 改进的形态开运算。按照 3.1 节对 LDSM 进行改进形态开运算的基本原理, 执行形态滤波运算: 1) 由 GFM 得到空白网格位置, 把 LDSM 中的最大高程值填充到空白网格中; 2) 利用形态学计算工具执行腐蚀运算, 得到腐蚀运算后的 LDSM (ELDSM); 3) 把 ELDSM 中的高程最小值填充到空白网格中, 其他网格内为 ELDSM 中对应的高程值; 4) 利用形态学计算工具执行膨胀运算, 得到膨胀运算后的 LDSM (DLDSM); 5) 对于存在数据点部分 (即 GFM 中为 1 的网格), 计算 LDSM 与 DLDSM 的高程差, 并判断其是否大于当前高差阈值。如果大于则判定对应网格处的数据点为非地面点, 对应网格处 GFM 的值更新为 0; 否则, 可能为地面点, 将在下一次形态滤波运算中做进一步判断; 6) 把 DLDSM 中的非地面点滤除后得到更新后的 LDSM 和 GFM, 并把它们作为下一次形态滤波的输入。

Step 4: 算法迭代。判断是否达到最大迭代次数, 如果是, 则转至 Step 5; 否则, 按照 (8) 式更新窗口尺寸, 并根据 (9) 式更新高差阈值 $h_{T,k}$, 转至 Step 3 继续进行形态滤波。高差阈值 $h_{T,k}$ 定义为

$$h_{T,k} = \begin{cases} h_0, & \text{if } \omega_k \leq 3 \\ s(\omega_k - \omega_{k-1})c + h_0, & \text{if } \omega_k > 3 \\ h_{\text{max}}, & \text{if } h_{T,k} > h_{\text{max}} \end{cases} \quad (9)$$

式中 c 为网格尺寸。

Step 5: 原始 LDSM 数据点分类。根据前面的形态滤波结果, GFM 中最终仍为 1 的网格对应的原始 LDSM 中的点即为地面点; 原始 GFM 中为 1, 滤波后 GFM 中为 0 的网格对应的原始 LDSM 中的点即为非地面点。

Step 6: 原始激光雷达三维点云数据滤波。利用原始 LDSM 中的地面点集, 插值估计所有存在数据点的网格处 (即原始 GFM 中为 1 的网格) 的地面高程值 (DEM)。通过搜索原始 LDSM 中的非地面点一定邻域内的地面点, 用这些地面点的高程值对非地面点处的地面高程值进行估计, 估计方法采用反距离加权法^[12, 18]。获得 DEM 后通过设定一个地

面高程阈值 h_{ground} 来对原始激光雷达点云数据中所有数据点进行滤波, 每个网格处的所有数据点, 与对应网格处的 DEM 值高程差在 h_{ground} 内的即为地面点, 否则为非地面点。

3.3 性能特点

1) 运算结果不变。对于 LDSM, 按照改进形态开运算的操作原理, 应用处理二维图像的形态学运算工具, 得到的形态开运算结果与实际数据条件下根据形态滤波基本原理 (腐蚀、膨胀运算的基本原理) 得到的结果相同、相对应。对于填补空白区域后的格网化 DSM (FDSM), 如果空白区域的插值估计相对准确, 将可能得到较好的结果, 但这是建立在空白区域得到的估计值与真实值相差无几的条件下。事实上, 如此高精度的估计是很难做到的, 必然会存在插值估计误差, 尤其当空白区域面积较大时, 误差会更大。若把存在误差的估计值作为实际观测值进行数据滤波, 必然带来虚假地面或地物的出现, 影响滤波效果。因此, 与 FDSM 相比, 应用改进形态开运算对 LDSM 进行滤波得到的结果将更真实合理。

2) 方便操作。实际操作过程中, 只需要在数据的格网化过程中, 用二维标志矩阵记录 LDSM 中存在数据点的网格和空白网格, 在进行形态滤波时, 就可以方便地对空白网格执行统一填充操作, 不需要做任何估计, 方便快捷。按照改进形态开运算的操作原理, 还可以充分利用处理二维图像的形态学运算工具, 解决了对 LDSM 无法应用矩阵运算的问题。

3) 执行效率较高。由于改进算法不需要对空白网格进行插值估计, 在滤波算法的第一阶段即对数据的格网化操作中, 节约了大量的计算资源, 执行效率较高; 尤其对存在较多大面积空白区域的观测数据, 效率提高更显著。

4 实验验证

4.1 仿真实验

为体现本文算法对存在大面积空白区域的激光雷达点云数据的滤波性能, 对图 5 中由存在树木植被、建筑物等严重遮蔽的观测区域点云数据^[19]进行滤波, 数据观测俯仰角 60° , 方位角 30° 。按照第 3 节中改进后的渐进多尺度数学形态学滤波方法的基本原理和算法流程, 采用 Matlab R2007b 编程实现, 主要参数分别为: $M=10, k_{\text{thr}}=4, s=0.25, h_0=0.15 \text{ m}, h_{\text{max}}=3 \text{ m}, c=0.15 \text{ m}$ 。图 6 为图 5 中的点云数据格网化 DSM 对应的 GFM, 可见其中存在较多的大面

积空白区域(白色点为存在数据的网格,黑色点为不存在数据的网格),其中 A、B、C 区域分别由观测视角、建筑物遮挡和树木植被遮蔽造成。

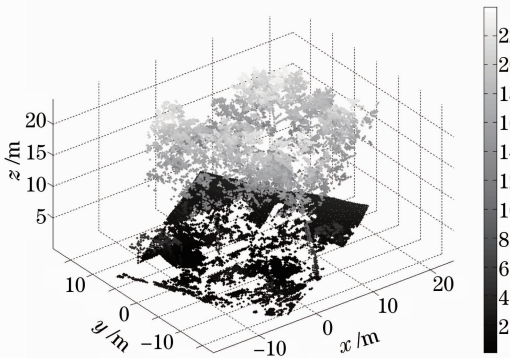


图 5 遮蔽条件下的激光雷达点云数据
Fig. 5 Ladar point-cloud data in the obscure condition

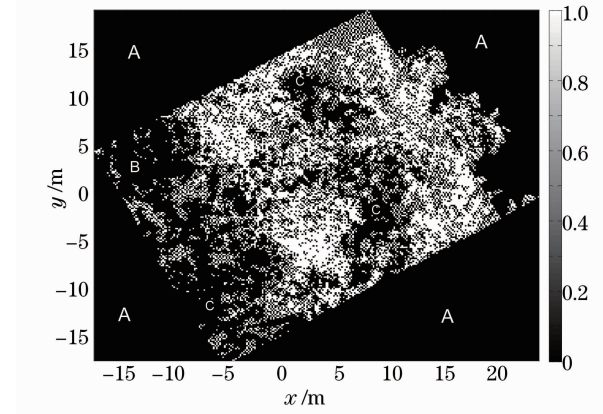
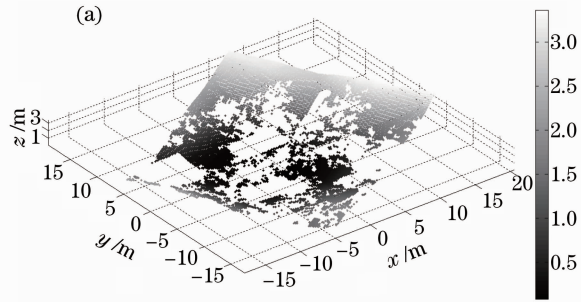


图 6 格网化 DSM 对应的 GFM
Fig. 6 GFM of the grid DSM

图 7 为滤波结果,对比图 5,可见较好地实现了地面点与非地面点的分离,验证了本文算法的可行性及对存在大面积空白区域的激光雷达点云数据的良好滤波性能。

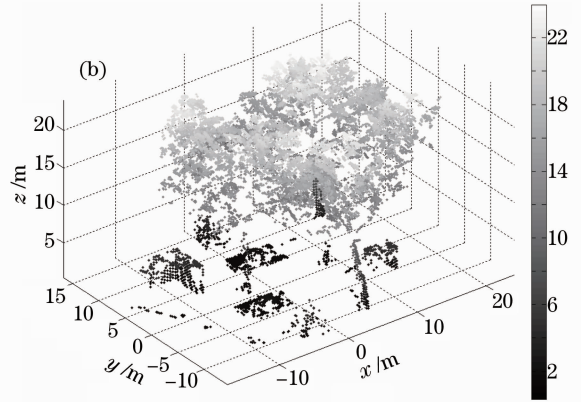


图 7 改进算法的滤波结果。(a)地面点;(b)非地面点

Fig. 7 Filtering results of the improved algorithm. (a) Ground point; (b) non-ground point

4.2 与其他算法的分析对比

为充分验证改进后的渐进多尺度数学形态学滤波算法在激光雷达数据滤波中的性能,将该算法与其他几种典型算法的滤波性能进行比较分析。实验采用 ISPRS 网站提供的激光雷达点云数据^[20],这些数据在 2003 年由 ISPRS Commission III 提供给广大学者用于比较不同滤波算法的性能,每组数据的相关描述如表 1 所示^[8,17]。

表 1 中给出的数据已由提供者进行了手工分类,将激光雷达点云数据精确分类为地面点和非地面点两类,利用分类后的样本数据,研究者可以对滤波算法进行分类误差的定量分析。表 2 给出了分类误差的定义^[8,9,11],包括第 I 类误差 (Type I)、第 II 类误差 (Type II) 和总误差 (Total error)。其中 a 表示滤波结果中地面点分类正确的点数; b 表示地面

点分类成非地面点的点数; c 表示非地面点分类成地面点的点数; d 表示非地面点分类正确的点数; e 为实际地面点的总数; f 为实际非地面点的总数; n 为样本中的所有数据点总数。

应用本文算法对表 1 中的每个数据样本进行滤波,把滤波结果与其对应的真实分类情况对比,并应用表 2 中定义的分类误差量化公式,得到滤波算法对每个样本数据的分类误差情况。表 3 中给出了本文算法实际滤波过程中的主要参数,这些参数均结合实际场景地形特点选择。表 4 给出了文献[8,9]中的总结的 8 种典型算法、文献[17]中的一种改进渐进多尺度数学形态学滤波方法以及本文算法对表 1 中所有样本数据的滤波总误差对比情况(前 9 种算法的滤波总误差数据来源于文献[8,9,17]),并给出了这 10 种算法的滤波总误差平均值、最小值和最大值。

表 1 观测场景和激光雷达数据的相关描述
Table 1 Descriptions for site conditions and relevant lidar data

Location	Sites	Special features of scene and terrain	Point spacing /m	Samples
Urban	1	Steep slopes, mixture of vegetation and buildings on hillside, buildings on hillside, data gaps	1~1.5	11
			2~3.5	12
	2	Large buildings, irregularly shaped buildings, road with bridge and small tunnel, data gaps	1~1.5	21
				22
3	Densely packed buildings with vegetation between them, building with eccentric roof, open space with mixture of low and high features, data gaps	1~1.5	23	
			24	
4	Railway station with trains (low density of terrain points), data gaps	1~1.5	31	
			41	
Rural	5	Steep slopes with vegetation, quarry, vegetation on river bank, data gaps	2~3.5	42
				51
	6	Large buildings, road with embankments, data gaps	2~3.5	52
				53
	7	Bridge, underpass, road with embankments, data gaps	2~3.5	54
61				
				71

表 2 滤波误差定义
Table 2 Definition of the filtering error

Category	Filtered		Total	Error /%	
	Ground points	Non-ground points			
Ground points	a	b	$e = a + b$	b/e	(Type I)
Non-ground points	c	d	$f = c + d$	c/f	(Type II)
Total			$n = e + f$	$(b + c)/n$	(Total)

表 3 滤波算法参数
Table 3 Parameters of filtering algorithm used for each sample

Sample	Grid size /m ²	k_{thr}	s	M	h_0 /m	h_{max} /m	h_{ground} /m
11	1×1	4	0.25	10	1	80	1
12	2×2	4	0.45	10	0.6	10	0.6
21	1×1	4	0.1	10	0.5	10	0.5
22	1×1	4	0.5	10	0.25	15	0.5
23	1×1	4	0.5	10	0.6	10	0.6
24	1×1	4	0.8	10	0.5	20	0.5
31	1×1	4	0.15	10	0.25	10	0.25
41	1×1	4	0.15	10	1	10	1
42	1×1	4	0.1	10	1	5	0.5
51	2×2	4	0.5	10	0.1	30	1
52	2×2	4	0.5	10	1.5	100	2
53	2×2	4	1	10	1.5	80	1
54	2×2	4	0.3	10	0.3	50	0.3
61	2×2	4	0.6	10	1	50	1
71	2×2	4	0.45	10	0.5	10	1

从表 4 中的对比情况可以看出,本文算法对各个样本数据的滤波总误差均小于平均值。在对 15 个样本数据滤波总误差最小值(下划线标注)对比中,本文算法占 6 个,Chen 的算法占 4 个,Axelsson

的算法占 5 个,且本文算法的非最小值滤波总误差与最小值相差均较小,充分验证了本文算法在对以上样本数据滤波中与其他典型算法相比的优越性。Chen 的算法与本文算法都属于对 Zhang 的渐进多

尺度数学形态学滤波算法^[14]的改进型(表4中用加粗字体进行了标注),但从这两种算法的对比情况看,对于大部分样本数据,本文算法的滤波总误差更小(占10个);即使对于比Chen的算法滤波总误差

较大的情况,也相差无几。这也进一步验证了这种改进后的渐进多尺度数学形态学滤波算法更优,对各种地形均具有较好的滤波效果,且本文算法与Chen的算法相比操作更方便简单。

表4 典型滤波算法对所有样本数据的滤波总误差对比情况

Table 4 Comparison of total errors for all samples of the ten representative filtering algorithms

Sample	Elmqvist / %	Sohn / %	Axelsson / %	Pfeifer / %	Brovelli / %	Roggero / %	Wack / %	Sithole / %	Chen / %	We / %	Mean / %	Min / %	Max / %
11	22.40	20.49	<u>10.76</u>	17.35	36.96	20.80	24.02	23.25	13.92	11.84	20.17	10.76	36.96
12	8.18	8.39	<u>3.25</u>	4.50	16.28	6.61	6.61	10.21	3.61	3.43	7.10	3.25	16.28
21	8.53	8.80	4.25	2.57	9.30	9.84	4.55	7.76	2.28	1.36	5.92	1.36	9.84
22	8.93	7.54	3.63	6.71	22.28	23.78	7.51	20.86	3.61	3.77	10.86	3.61	23.78
23	12.28	9.84	<u>4.00</u>	8.22	27.80	23.20	10.97	22.71	9.05	6.99	13.50	4.00	27.80
24	13.83	13.33	4.42	8.64	36.06	23.25	11.53	25.28	3.61	6.18	14.61	3.61	36.06
31	5.34	6.39	4.78	1.80	12.92	2.14	2.21	3.15	1.27	0.99	4.09	0.99	12.92
41	8.76	11.27	13.91	10.75	17.03	12.21	9.01	23.67	34.03	5.23	14.58	5.23	34.03
42	3.68	1.78	1.62	2.64	6.38	4.30	3.54	3.85	2.20	1.30	3.12	1.30	6.38
51	23.31	9.31	2.72	3.71	22.81	3.01	11.45	7.02	2.24	2.71	8.82	2.24	23.31
52	57.95	12.04	<u>3.07</u>	19.64	45.56	9.78	23.83	27.53	11.52	5.74	21.66	3.07	57.95
53	48.45	20.19	8.91	12.60	52.81	17.29	27.24	37.07	13.09	5.60	24.32	5.60	52.81
54	21.26	5.68	3.23	5.47	23.89	4.96	7.63	6.33	2.91	3.68	8.50	2.91	23.89
61	35.87	2.99	2.08	6.91	21.68	18.99	13.47	21.63	2.01	1.58	12.72	1.58	35.87
71	34.22	2.20	<u>1.63</u>	8.85	34.98	5.11	16.97	21.83	3.04	2.68	13.15	1.63	34.98

5 结 论

激光雷达点云数据的滤波处理是激光雷达数据处理的基础和至关重要的步骤,是数字高程模型生成、建筑物三维重建以及目标检测与分类等应用中的重要研究内容。从众多激光雷达数据滤波算法的总结分析看,基于数学形态学的滤波算法具有简单便捷、计算效率高等优点。针对现有基于数学形态学滤波算法在点云数据格网化过程中存在的空白区域插值误差问题,详细分析了对大面积空白区域进行插值时存在的诸多难点,通过改进形态开运算,提出了一种不对空白区域进行插值处理的改进的渐进多尺度数学形态学滤波算法。根据数学形态学滤波的基本原理,证明了所提算法的可行性。针对基于数学形态学的滤波方法在实际操作中的窗口尺寸增长方式问题,提出了一种基于混合增长方式的渐进窗口控制模式。根据各项改进措施,详细阐述了改进算法的基本步骤和实现流程,并分析了改进后算法的优良性能特点。通过实验验证,验证了所提算法的可行性和对存在大面积空白区域的激光雷达点云数据的良好滤波性能;根据ISPRS提供的公开测试数据,与其他9种典型滤波算法进行了对比分析,发现大多数情况下算法具有更好的滤波性能。

参 考 文 献

- Zeng Qihong. Airborne LiDAR Point Cloud Data Processing and 3D Building Reconstruction [D]. Shanghai: Shanghai University, 2009. 4~7
曾齐红. 机载激光雷达点云数据处理与建筑物三维重建[D]. 上海: 上海大学, 2009. 4~7
- Zuo Zhiquan, Zhang Xuxun, Zhang Jianqing. Classification of LiDAR point clouds for urban area based on multi-echo region ratio and recognition topology model [J]. *Chinese J. Lasers*, 2012, **39**(4): 0414001
左志权, 张祖勋, 张剑清. 区域回波比率与拓扑识别模型结合的城区激光雷达点云分类方法[J]. *中国激光*, 2012, **39**(4): 0414001
- Nguyen Tien Thanh, Liu Xiuguo, Wang Hongping *et al.*. 3D model reconstruction based on laser scanning technique [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, **48**(8): 081201
Nguyen Tien Thanh, 刘修国, 王红平等. 基于激光扫描技术的三维模型重建[J]. *激光与光电子学进展*, 2011, **48**: 081201
- Zhang Xiaohu, Ou Jianliang, Yuan Yun *et al.*. Stack-yard 3D measurement based on photogrammetry and projected contour aiding [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(6): 0612002
张小虎, 欧建良, 苑云等. 投影轮廓线辅助下的堆场三维形貌摄影测量研究[J]. *光学学报*, 2011, **31**(6): 0612002
- T. Chevalier, P. Andersson, C. Grönwall *et al.*. Methods for Ground Target Detection and Recognition in 3-D Laser Data [R]. Sweden: FOI-Swedish Defence Research Agency, 2006
- C. Grönwall, G. Tolt, T. Chevalier *et al.*. Spatial filtering for detection of partly occluded targets [J]. *Opt. Engng.*, 2011, **50**(4): 047201
- S. Roy, J. Maheux. Baseline processing pipeline for fast automatic target detection and recognition in airborne 3D lidar

- imagery[C]. *SPIE*, 2011, **8049**: 80490S
- 8 G. Sithole, G. Vosselman. ISPRS Comparison of Filter [R/OL]. <http://www.itc.nl/isprswgIII-3/filtertest/Report050802003.pdf>, 2003
- 9 G. Sithole, G. Vosselman. Experimental comparison of filter algorithms for bare-earth extraction from airborne laser scanning point clouds [J]. *J. Photogrammetry & Remote Sensing*, 2004, **59**(1-2): 85~101
- 10 X. Meng, N. Currit, K. Zhao. Ground filtering algorithms for airborne LiDAR data; a review of critical issues [J]. *Remote Sensing*, 2010, **2**(3): 833~860
- 11 Luo Yiping, Jiang Ting, Gong Zhihui *et al.*. An adaptive and multi-scale mathematic morphological filter for point cloud data filtering [J]. *J. Geomatics Science and Technology*, 2009, **26**(6): 426~429
罗伊萍, 姜挺, 龚志辉等. 基于自适应和多尺度数学形态学的点云数据滤波方法[J]. *测绘科学技术学报*, 2009, **26**(6): 426~429
- 12 Lai Xudong. Basic Principles and Applications of Airborne Lidar [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2010
赖旭东. 机载激光雷达基础原理与应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2010
- 13 J. Kilian, N. Haala, M. Englich. Capture and evaluation of airborne laser scanner data [J]. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 1996, **53**: 383~388
- 14 K. Zhang, S. C. Chen, D. Whitman *et al.*. A progressive morphological filter for removing nonground measurements from airborne LIDAR data [J]. *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2003, **41**(4): 872~882
- 15 K. Zhang, D. Whitman. Comparison of three algorithms for filtering airborne LiDAR data [J]. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 2005, **71**(3): 313~324
- 16 Luo Yiping, Jiang Ting, Wang Xin *et al.*. A new filtering method for LiDAR data based on mathematic morphological approach [J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2011, (3): 15~19
罗伊萍, 姜挺, 王鑫等. 基于数学形态学的LiDAR数据滤波新方法[J]. *测绘通报*, 2011, (3): 15~19
- 17 Q. Chen, P. Gong, D. Baldocchi *et al.*. Filtering airborne laser scanning data with morphological methods [J]. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 2007, **73**(2): 175~185
- 18 Yin Fei. Research on Filtering Algorithm of Airborne LIDAR Data [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2010
殷飞. 机载激光雷达数据滤波方法研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2010
- 19 Zhao Mingbo, He Jun, Fu Qiang. Simulation modeling and analysis of full-waveform lidar signatures [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(6): 0628002
赵明波, 何峻, 付强. 全波形激光雷达回波信号建模仿真与分析[J]. *光学学报*, 2012, **32**(6): 0628002
- 20 G. Vosselman. Test Sites [DB/OL]. [2012-06-13]. <http://www.itc.nl/isprswgIII-3/filtertest/DownloadSites.htm>

栏目编辑: 何卓铭