

# 窗口迭代的克里金法过滤机载 LiDAR 点云

李峰, 崔希民, 袁德宝, 刘甜甜, 谭雪航

中国矿业大学(北京)地球科学与测绘工程学院, 北京 100083

**摘要** 机载 LiDAR 点云处理的首要一步是过滤非地面点云而保留地面点云。根据 LiDAR 点云的高程值在空间分布的不规则性, 一种窗口迭代的克里金法被用来过滤掉地物对象点。首先, 通过点云的高程直方图滤除低位和高位的粗差点云。然后, 以点云的平均点间距作为初始窗口大小, 根据周围 8 邻域格网的高程值, 使用克里金内插法拟合出中心格网的高程值; 当拟合值与中心格网原始高程值之差大于设定的高差阈值时, 中心格网内的点云就被归类为地物点, 剩余未分类的点重新被内插成新的格网, 窗口大小变为原来的 2 倍。随着窗口的不断增大, 剩余的点被继续分类直到窗口达到最大为止。选取国际摄影测量与遥感协会 (ISPRS) 提供的 15 个样本数据测试这种算法, 并与其他 8 种算法进行对比, 结果发现窗口迭代的克里金法的 I 类误差和总误差较小, 说明本算法在滤波方面具有一定的参考价值。

**关键词** 窗口迭代; 克里金法; 滤波; LiDAR 点云

中图分类号 P231

文献标识码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2012.26.002

## A Window Iterative Kriging Algorithm for Filtering Airborne LiDAR Point Clouds

LI Feng, CUI Ximin, YUAN Debao, LIU Tiantian, TAN Xuehang

College of Geoscience and Surveying Engineering, China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China

**Abstract** The first and significant step for processing airborne LiDAR is to remove non-terrain point clouds and reserve ground point clouds. According to the irregularities of elevation on LiDAR point clouds in the spatial distribution, a window iterative Kriging algorithm is proposed for filtering off objects from terrain point clouds. First of all, an elevation histogram of point clouds is used to filter low and high outliers. Then average point spacing is taken as the size of initial window, a Kriging interpolation method is adopted to fit the elevation of central grid by using the elevations of eight neighbor grids. If the height difference between fitting value and original height is larger than a height threshold, point clouds lying in the grid cell would be classified as object points. Then surplus points are interpolated into new grids with a size of window is twice as big as previous one. With the exponential increase of the size of window, surplus point clouds continue to be classified until the biggest window size is reached. Fifteen sampled data provided by ISPRS is used to test the method and eight other algorithms are compared with this method. The results show that type I error and total error of the method are less than the corresponding errors of most other methods. Therefore, the algorithm has some reference values for filtering LiDAR point clouds.

**Keywords** iterative window; Kriging algorithm; filtering; LiDAR point clouds

### 0 引言

LiDAR(Light Detection and Ranging)系统是激光探测及测距系统的简称,它通过测量发射的激光脉冲返回 LiDAR 传

感器的时间来确定地面对象点与传感器的距离, 辅以 GPS/IMU(惯性测量系统, Inertial Measurement Unit)设备获取地面高密度的、精确的三维 LiDAR 点云(激光点云)。与传统的测

收稿日期: 2012-06-08; 修回日期: 2012-07-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(41071328)

作者简介: 李峰, 工程师, 研究方向为机载和车载 LiDAR 点云处理及遥感, 电子信箱: lif1223@yahoo.com.cn; 崔希民(通信作者, 中国科协所属全国学会个人会员登记号: E3824500005M), 教授, 研究方向为 3S 集成与应用、形变灾害监测及三维工业测量, 电子信箱: cxm@cumtb.edu.cn

绘手段相比,机载 LiDAR 技术提供了更加快速和精确的制图方案,欧美一些国家已经在使用机载 LiDAR 系统生产区域或国家级的高分辨率数字高程模型 (Digital Elevation Model, DEM)<sup>[1]</sup>。机载 LiDAR 点云包括地表裸露的地面点和非地面地物点,如树木、建筑物等。移除非地面点而保留地面点类的过程,也称为点云的滤波技术,提取的地面点类被重采样成 DEM,而地物点可以用来探测建筑物并重建城市的三维模型,提取树木、电力线等特征地物。目前多数 LiDAR 点云过滤算法在平原地区表现较好,但在复杂的山地都会产生不同程度的误差,因此寻找一种过滤算法提升 LiDAR 点云的过滤精度是十分必要的。

## 1 机载 LiDAR 点云过滤的研究进展

为了满足工程应用的需要,许多过滤算法提出分类机载 LiDAR 点云。1998 年,Kraus 和 Pfeifer<sup>[2]</sup>针对森林地区的 LiDAR 点云提出了一种线性迭代预测方法。首先,为地面点和非地面点赋予相同的权重值,计算出位于地面点和植被点之间的一个平均平面。假设地面点更可能有较大的正残差,而地物点有负的或较小的正残差,利用一个关于点云残差的权重函数,为每个点计算一个新的权重值。那些有较大残差的点将会被移除,剩余的点将继续迭代直到没有更多的点被剔除。后来,这种方法被 Jacobsen 和 Passini<sup>[3]</sup>扩展到城市区域,他们利用一个低阶的多项式或移动平面从原始点云中分离出一个趋势面,然后计算趋势面与原始点云的差值(中心测量值),中心测量值大于阈值的就认为是噪声点云,程序迭代直到没有更多的点被拒绝;基于邻近点云的相关性,利用方差公式计算得到一个线性预测值,当线性预测值与中心测量值之差大于某一阈值时,就剔除这个点。

2000 年,Vosselman<sup>[4]</sup>设计了一个包含点间的坡度和水平距离的坡度过滤器,那些坡度高于某一阈值的点就归类为非地面点,反之归类为地面点。但是,这个过滤器很难适应地形起伏区域和城市建筑物区。为了克服这些限制,2001 年,Sithole<sup>[5]</sup>基于自适应坡度法修改了这个过滤器。首先,从最小高程格网中计算一个初始的地形坡度值;然后,预乘一个大于 1 的坡度因子得到膨胀的坡度;对于平坦或小起伏地域,小于最小阈值坡度的点予以保留,大于阈值坡度的点将根据自适应坡度过滤器和膨胀后的坡度来判定点类的归属。这种自适应坡度方法提高了小起伏区域的过滤能力,但是在陡崖和大型建筑物处却面临诸多困难。为解决这个问题,2010 年 Wang 和 Tseng<sup>[6]</sup>开发出一种双向自适应过滤器,其基本思路是将原始的坡度过滤器分割成 2 个对称的过滤器,只要点云的坡度条件满足其中任何一个过滤器,就认为是地面点;如果点云的坡度超出了这 2 个过滤器,则认为是地物点。

Axelsson<sup>[7]</sup>描述的自适应 TIN (Triangulated Irregular Network, 不规则三角网)法已经被成功地运用到著名商业软件 Terrascan 中。首先,格网大小指定为最大建筑物的尺寸,每

个格网中的最低点选作为种子点,这些种子点用来生成一个初始粗略的 TIN。对于位于 TIN 上的点,如果满足一定的距离和角度条件就会被添加到 TIN 中,对于那些高程突变点和边缘点,使用镜面点方法进行判断,这种迭代加密的过程持续进行直到没有更多的点添加到 TIN 中。

参照 Kilian 和 Lohmann 等关于数学形态学的处理方法<sup>[8-9]</sup>,2003 年 Zhang 等<sup>[10]</sup>研究出一种渐进式数学形态学方法来探测和移除非地面点。由于形态学的开启运算的小窗口可以过滤掉单棵树等小型地物,而大的窗口能过滤掉建筑物点,所以递增窗口的开算子可以移除植被和建筑物等地物信息;为了避免高山地区出现过度过滤的情形,引入了一个关于平均地形坡度的高差阈值。2007 年,Chen 等<sup>[11]</sup>采用一个小型窗口的开算子移除大部分的植被,再用渐进式递增窗口过滤掉沿着边缘有大的高差的建筑物点而保留边缘有较少变化的地面点。2009 年,Li 和 Wu<sup>[12]</sup>提出了一种形态学梯度方法,先计算每个格网的梯度值,如果中心格网的梯度大于一个阈值且周围邻近格网的高程大于中心格网的高程,则周围邻近格网就执行一次条件侵蚀,即高的邻近格网高程会被中心格网的高程所取代;条件侵蚀后,再执行一次条件膨胀,当格网的高程大于初始高程时,这个点就被分类为地物点。这个过程持续迭代直到达到最大窗口为止。数学形态学方法的最大局限是随着窗口的增大,更多的地形细节可能会丢失。

机载 LiDAR 点云的滤波方法多种多样,基于地表是连续变化的表面的假设,这些算法大多能实现地面点和地物对象的分离,对地形起伏缓慢的平原区域有着较好的滤波效果,但是对于不连续的地形(陡崖)或者高程突变的建筑物区域往往滤波精度较低。为了进一步改善 LiDAR 点云的过滤精度,提升算法在不同地形地物特征区域的滤波能力,本文依据克里金插值原理,尝试使用窗口迭代的克里金法过滤 LiDAR 点云,以期提高算法对复杂场景的适应性。

## 2 克里金法过滤机载 LiDAR 点云

### 2.1 数据预处理

机载 LiDAR 设备在采集激光点云数据的过程中,由于低飞的鸟类、空中漂浮物、多路径效应以及 LiDAR 设备自身误差的影响,往往导致生成的原始激光点云数据中包含少量的低位和高位的噪声点云,尤其对于高程较小的点,由于未必是地面点(有可能是粗差点),所以这些噪声点云会严重削弱后期提取 DEM 的精度。因此,在内插激光点云之前,需要剔除这些噪声点云。通常根据激光点云生成的高程直方图的分布情况,分别确定高位和低位点云的高程阈值,移除低位和高位噪声点云<sup>[13]</sup>。

计算点云的平均点间隔  $p$ ,取整后作为初始的格网尺寸。落入规则格网内的 LiDAR 点云,高程最小的点属于地面点类的可能性最大,所以取最低点表示每个格网的高程值;如果格网内未包含任何激光点云,那么根据最近邻原则,取距离

格网最近的点的高程代表空白格网的高程值。

### 2.2 克里金插值模型

克里金插值法是由 Kriging 提出的空间局部估计的优化插值方法,它通过分析空间相关范围内若干信息样品的某种特征数据,对每个样品值分别赋予一定的权系数,使用加权平均法对范围内具有同类特征的未知数据进行计算,以达到线性、无偏和最小方差估计。

设  $Z(x)$  为点承载的区域化变量,它是一个二阶本征函数。 $Z(x_i)(i=1,2,\dots,n)$  为一组离散的采样点数据,  $\lambda_i$  为离散采样点的权系数,则在点  $x_0$  处的线性估计量可表示为

$$Z(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i) \quad (1)$$

在要求估计量式(1)是无偏估计同时估计方差  $\sigma_E^2$  最小的条件下,根据拉格朗日乘数法可以推导出用变差函数  $\gamma(h)$  表示的普通克里金方程组:

$$\begin{cases} \sum_{j=1}^n \lambda_j \gamma(x_i, x_j) + \mu = \gamma(x_i, x) \\ \sum_{i=1}^n \lambda_i = 1 \end{cases} \quad (2)$$

式(2)用矩阵形式表示为

$$K\lambda = M \quad (3)$$

其中,采样数据点间的半方差矩阵为

$$K = \begin{bmatrix} \gamma_{11} & \gamma_{12} & \cdots & \gamma_{1n} & 1 \\ \gamma_{21} & \gamma_{22} & \cdots & \gamma_{2n} & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \gamma_{n1} & \gamma_{n2} & \cdots & \gamma_{nn} & 1 \\ 1 & 1 & \cdots & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

权重系数向量及拉格朗日算子  $\lambda = [\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n, \mu]^T$ , 采样数据点与未知点之间的半方差向量  $M = [\gamma(x_1, x), \gamma(x_2, x), \dots, \gamma(x_n, x), 1]^T$ 。

为了估计区域化变量的未知值,通常需要将实验变差函数拟合合成相应的理论变差函数,常用的理论变差函数模型有球状模型、指数函数模型和高斯模型<sup>[14-15]</sup>。由于核方差相对于空间变化有关的随机变化很小,因此采用具有弯曲曲线的高斯模型可以较好地拟合 LiDAR 点云数据。高斯模型如图 1 所示,它的一般公式为式(4)。

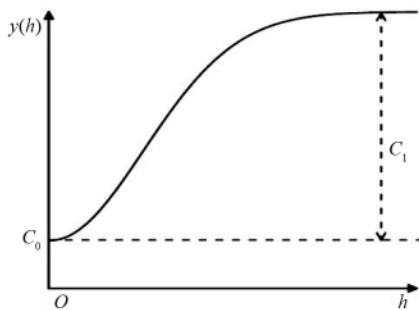


图 1 高斯变差图  
Fig. 1 Gaussian variogram

$$\gamma(h) = C_0 + C_1 [1 - \exp(-h^2/a^2)] \quad (4)$$

其中,  $C_0, C_1$  分别为变差函数的块金常数(核方差)和拱高;  $h$  为采样间隔或延迟;  $a$  并非变程,  $\sqrt{3}a$  为变程值。

变差函数模型的参数计算一般通过经验值估计法或多项式回归分析法求得。经过实验计算得知块金常数  $C_0$  和拱高  $C_1$  对激光点云拟合精度影响较小,而随着参数  $a$  值的降低,激光点云拟合精度逐步提高。另外,为了减少程序计算量,本文采取经验值估计法确定高斯变差函数模型的参数。在 LiDAR 点云数据的间距无限接近且近似为零的情况下,可认为点云近似重合,则属于同种地物类型的点云之间的高程中误差可认为近似等于块金常数  $C_0$ ; 当 LiDAR 点云之间的采样距离在最大采样数据范围时,变差函数值会趋于稳定,此时设置最大点云高程中误差作为拱高  $C_1$  的近似值; 为了保证 LiDAR 点云的拟合精度,经过实验得出参数  $a$  的取值为 0.3。

### 2.3 窗口迭代法过滤非地面点云

将待拟合格网周围的 8 个格网的高程值作为采样数据点,利用式(4)计算出采样数据点的半方差矩阵  $K$  和半方差向量  $M$ ,由式(3)计算出采样点的权重系数后,使用式(1)插值出未知格网的高程值。将插值出的格网点高程与落入该格网内的 LiDAR 点云的高程求差,如果高差大于一个预先设定的高程阈值,则判定此格网为非地面格网,格网内的激光点归类为非地面点。高程阈值  $T_h$  设置如下:

$$T_h = \begin{cases} sc & c=p \\ sc + 2^{k+1} \sqrt{(cd_{xy})^2 + d_h^2} & c>p \end{cases} \quad (5)$$

其中,  $s, c$  分别为地形的平均坡度和格网间距;  $d_{xy}, d_h$  分别为 LiDAR 点云的平面和高程中误差;  $p$  为点云的平均间距,  $k = 0, 1, 2, \dots$ 。

首次过滤点云结束后,格网的间距设定成前一次格网大小的 2 倍,如果此时的格网间距小于最大窗口的大小,则继续重复以上过程。注意需要将过滤非地面点后剩余的点云重新内插到新的格网中,迭代直到递增的格网尺寸大于最大窗口大小为止,这里最大窗口大小根据量测的区域中的最大建筑物的宽度来设置。为了提高程序的运算效率,在计算地形平均坡度时,从不同的地形类型(平原、丘陵、山地)处分别手工量测 3—5 个坡度值,取其平均值后作为全区域地形的平均坡度值。循环迭代后,剩余的未处理点云归类为候选地面点类,迭代次数取决于最大窗口大小。

窗口迭代法过滤后的候选点云仍然存在着少量的非地面点,为了进一步过滤掉这些地物点,直接使用一个较小的窗口,执行一次数学形态学中的开启运算去除非地面点,最终保留下来的 LiDAR 点云统一归类到地面点类中。开启运算是图像处理中腐蚀后紧跟着膨胀的操作,开启运算可以平滑地物对象的边缘,能够把比结构元素小的突刺过滤掉,切断并分割细长的连接<sup>[16]</sup>。开启运算的定义为

$$G(i, j) = [F(i, j) \ominus H(i, j)] \oplus H(i, j) \quad (6)$$

式中,  $F(i, j)(1 \leq i, j \leq N)$  为二值图像,而  $H(i, j)(1 \leq i, j \leq L)$  为

结构元素数组,即此处的运算窗口, $L$  为奇数;符号  $\ominus$  为腐蚀运算, $\oplus$  为膨胀运算。

如 2.1 节所述,先将窗口迭代法过滤后剩余的候选点云内插成以平均点间距为大小的规则格网,然后以一个  $3 \times 3 - 7 \times 7$  的格网作为窗口尺寸,对运行一次开启运算后的格网与开启运算前对应格网的高程求差值,如果高差大于一个高差阈值,那么这个格网就被标识为非地面点格网,而高差阈值取式(5)中  $k=0$  时所计算的高差。最后,把那些 LiDAR 点云的高程与标识为地面点格网的高程比较,将高差小于  $0.5\text{m}$  的点归类为地面点类。

### 3 测试数据

本算法所使用的数据来源于国际摄影测量与遥感协会 (ISPRS) 第三委员会提供的专门用于测试 LiDAR 点云滤波算法的数据 (<http://www.itc.nl/isprswgIII-3/filtertest/index.html>)。为了评估参与实验的 8 种滤波算法在复杂场景下的表现力,选择包含不同特征的 8 个场景数据(建筑物、铁路、公路、河流、植被、电力线等),这些数据包括了 4 个城市场景和 4 个农村场景,城市和农村场景点云的平均间距分别为  $1-1.5\text{m}$  和  $2-3.5\text{m}$ 。从这 8 个场景数据中抽取 15 个样本数据测试算法的精度,这些点云的分类结果经过手工分类、参考航空影像和基于场景知识的方法完成。采集数据的地点位于 Vaihingen/Enz 测试场和 Stuttgart 市中心,采集的仪器为 Optech ALTM 型激光扫描仪。

### 4 测试结果与分析

为了定量评估各算法对 LiDAR 点云的滤波精度,2004 年 Sithole 和 Vosselman<sup>[7]</sup> 提出利用混淆矩阵推导的 I 类误差、II 类误差和总误差来检测点云的滤波精度。I 类误差是指滤波算法错误地将地面点类归类成非地面点类所生成的误差,与之相反,II 类误差是指地物点类被误分成地面点类所带来的误差<sup>[7]</sup>,总误差是介于二者之间的最终精度评定误差。窗口迭代的克里金法过滤处理完成 15 个样本点云数据并与真实分类结果对比后,将生成的 I 类、II 类以及总误差与参加 ISPRS 测试的 8 种算法一起分别生成 I 类、II 类和总误差图,分别见图 2—图 4,右侧图例中的 WltKriging 为窗口迭代的克里金算法,其余分别表示 Elmqvist 算法、Sohn 算法、Axelsson 算法、Pfeifer 算法、Brovelli 算法、Roggero 算法、Wack 算法、Sithole 算法。

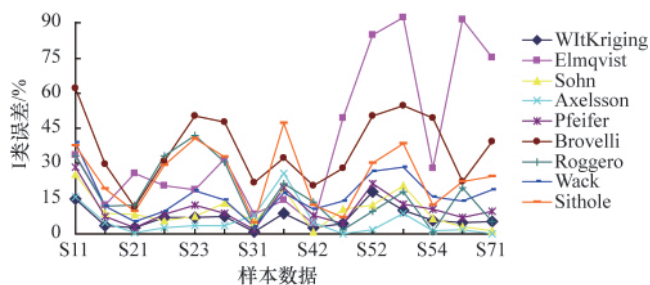


图 2 9 种滤波算法生成的 I 类误差

Fig. 2 Type I errors generated by nine filtering algorithms

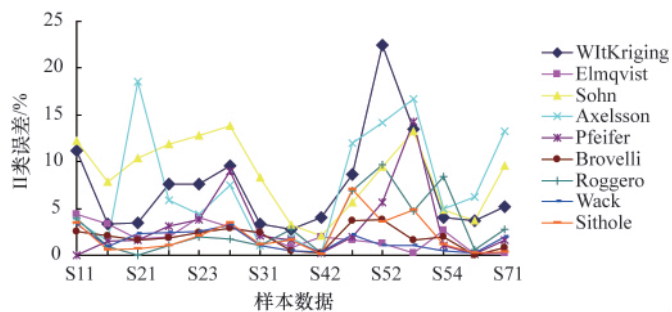


图 3 9 种滤波算法生成的 II 类误差

Fig. 3 Type II errors generated by nine filtering algorithms

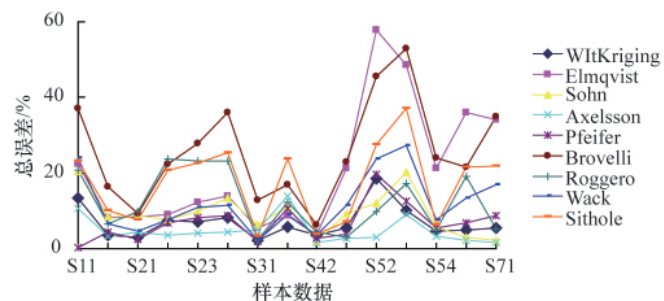


图 4 9 种滤波算法生成的总误差

Fig. 4 Total errors generated by nine filtering algorithms

算法、Pfeifer 算法、Brovelli 算法、Roggero 算法、Wack 算法、Sithole 算法,其中 Axelsson 算法已经被成功地运用到 Terrascan 商业软件包中。窗口迭代克里金法生成的 I 类、II 类和总误差如表 1 所示。

表 1 窗口迭代克里金法在 15 个样本数据中的误差

Table 1 Errors generated by window iterative Kriging algorithm for fifteen sample data

样本	I 类误差/%	II 类误差/%	总误差/%
S11	14.82	11.17	13.26
S12	3.69	3.37	3.54
S21	2.78	3.48	2.93
S22	7.08	7.64	7.25
S23	6.85	7.58	7.2
S24	7.51	9.57	8.08
S31	0.98	3.37	2.08
S41	8.76	2.72	5.73
S42	2.58	4.08	3.64
S51	4.42	8.65	5.35
S52	17.94	22.44	18.42
S53	9.88	13.46	10.02
S54	5.5	3.98	4.68
S61	4.82	3.73	4.79
S71	5.35	5.2	5.33

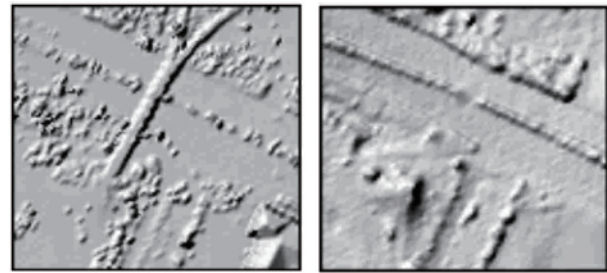
从图 2 可以看出,在 15 个样本数据中,窗口迭代的克里

金法生成的 I 类误差总体较小,在 S11(2.93%)、S31(0.98%)和 S41(8.76%) 样本处精度最高, 总体 I 类误差稍大于 Axelsson 算法。图 3 表明,窗口迭代的克里金算法产生的 II 类误差整体较大,基本上排在 Sohn 算法和 Axelsson 算法之后,但是在 S52 样本中产生的 II 类误差(22.44%)远超过其他算法,同样在 S52 样本中的 I 类误差(17.94%)在整个窗口迭代的克里金法中是最大的。图 4 的最终总误差显示,窗口迭代的克里金法生成的整体误差较小,其中在 S21(2.93%)、S41(5.73%) 样本中的误差在 9 种算法中最小,总误差在 15 个样本数据中仅次于 Axelsson 算法。

样本 S11、S12、S21、S22、S23、S24、S31、S41 和 S42 位于城市平原地区,表 1 表明样本 S11、S12、S41 的 II 类误差小于 I 类误差;样本 S21、S31、S42 的 II 类误差虽大于 I 类误差却小于 6%;样本 S22、S23、S24 的 II 类误差不仅大于 I 类误差而且还超过了 6%。样本 S51、S52、S53、S54、S61、S71 位于农村地区,坡度相对较大,表 1 表明样本 S51、S52、S53 的 II 类误差大于 I 类误差且超过 6%;样本 S54、S61、S71 的 II 类误差小于 I 类误差且小于 6%。

9 种算法在 15 个样本数据的测试中都较好地 LiDAR 点云数据中分离了地物对象点而保留了地面点,除窗口迭代克里金算法、Axelsson 算法及 Sohn 算法外,其余的 6 种算法更侧重于通过大幅减小 II 类误差的方法来降低总误差的大小,这样做的结果是过度过滤掉了对构建 DEM 有重要作用的地面点类,从而降低了 II 类误差的大小,这样可能会丢失 DEM 的部分细节。窗口迭代克里金算法、Axelsson 算法及 Sohn 算法更强调通过降低 I 类误差的大小提高总体过滤精度,这样做的优点在于尽量保留地面特征点类。2004 年, Sithole 和 Vosselman<sup>[7]</sup>指出,与 I 类误差相比,II 类误差产生的错误点类更容易被修复;另外,I 类误差会导致数据空白,而且很难判断空白是由 I 类误差还是由剔除的地物点造成的。所以,适当增大 II 类误差而减小 I 类误差有利于后续的数据处理工作。

样本 S21 处的数据特点是具有大建筑物、桥梁、小的隧道以及数据空白,S41 处的样本数据特点是不规则大建筑物和大数据空白。窗口迭代的克里金法在这两个区域的精度最高,说明这种方法在地形变化缓慢的建筑物区域和数据空白处有较好的过滤效果。图 5 和图 6 分别展示的是样本 S21 和 S41 的 DSM(数字表面模型,Digital Surface Model)和窗口迭代法过滤后的 DEM,过滤后的结果显示仍然存在细微的 II 类误差。样本 S52 区域的地形特点是,建筑物稀少,陡峭山地、河流并存并覆盖有中低高度的植被。窗口迭代的克里金算法需要借助于最大建筑物的宽度来结束迭代循环,使用区域的平均坡度、高程中误差、平面中误差计算一个统一的高差判读阈值,虽然后一步的形态学的开启运算可以滤除部分地物点类,但一次过滤量毕竟很少,这样就导致在 S52 区域产生了相对较大的 II 类误差和 I 类误差。样本 S51、S52、S53、S54、



(a) 样本 S21 的 DSM

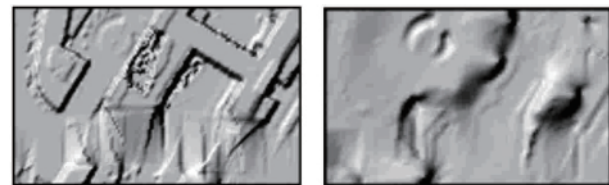
(b) 样本 S21 的 DEM

(a) DSM of sample S21

(b) DEM of sample S21

图 5 样本 S21 的 DSM 和迭代窗口克里金法过滤后的 DEM

Fig. 5 DSM and DEM filtered by window iterative Kriging algorithm for sample S21



(a) 样本 S41 的 DSM

(b) 样本 S41 的 DEM

(a) DSM of sample S41

(b) DEM of sample S41

图 6 样本 S41 的 DSM 和迭代窗口克里金法过滤后的 DEM

Fig. 6 DSM and DEM of S41 filtered by window iterative Kriging algorithm for sample S41

S61 和 S71 处数据也同属于地形高差变化大的区域,但滤波精度却较好。窗口迭代克里金法产生的 II 类误差点绝大部分位于地物顶部的中间部分,如建筑物的顶部,原因是窗口迭代不够大或者是区域的统一高差阈值较大所导致。

## 5 结论

窗口迭代的克里金法在过滤 ISPRS 提供的 15 个样本数据时表现出了较好的精度,特别是在地形不连续处,如数据空白、建筑物、桥梁区域。算法总体上产生了较小的 I 类误差和较大的 II 类误差,总误差精度接近于 Axelsson 算法。虽然 II 类误差会导致更多的非地面点被错分为地面点类,但是经验表明,II 类误差更容易用手工修复,如此就能最大限度地保证滤波的精度。算法联合使用了区域的平均坡度、LiDAR 点云的高程中误差和平面中误差来为每次的窗口迭代提供一个递增的统一高差阈值,由于设置的参数不同,生成的高差阈值也不同,所以一个过大的高差阈值可能会产生较大的 II 类误差,过小的高差阈值会产生较大的 I 类误差。此外,克里金插值方法考虑了数据空间场的规律,充分利用了数据点之间的相关性,消除了数据分布不均带来的误差,但是直接根据经验法估计的块金常数、拱高和变程值可能精度不高,影响待定点的拟合精度,从而导致过滤误差的增大;克里金插值法的算法结构复杂,计算量大,再进行窗口的循环迭代就会影响程序的执行效率。因此,除了考虑一种自适应坡度的

高差阈值计算公式用以减少 II 类误差外,在不降低克里金插值法拟合精度的条件下,减少算法的迭代次数,提高代码执行的效率是本文下一步的研究方向。

### 参考文献 (References)

- [1] Meng X L, Currit N, Zhao K G. Ground filtering algorithms for airborne LiDAR data: A review of critical issues [J]. *Remote Sensing*, 2010, 2(3): 833-860.
- [2] Kraus K, Pfeifer N. Determination of terrain models in wooded areas with airborne laser scanner data [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 1998, 53(4): 193-203.
- [3] Jacobsen K, Passini R. Filtering of digital elevation models [C]. The ASPRS Annual Convention, Washington DC, USA, April 19-26, 2002.
- [4] Vosselman G. Slope based filtering of laser altimetry data[J]. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2000, 33 (B3): 935-942.
- [5] Sithole G. Filtering of laser altimetry data using a slope adaptive filter[J]. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2001, 34 (3/W4): 203-210.
- [6] Wang C K, Tseng Y H. DEM generation from airborne LiDAR data by an adaptive dual-directional slope filter [C]//Wagner W, Székely B. Proceedings of ISPRS Commission VII Symposium-100 Years ISPRS: Advancing Remote Sensing Science. Vienna: ISPRS, 2010: 628-632.
- [7] Axelsson P. DEM generation from laser scanner data using adaptive TIN models[J]. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2000, 33(B3): 85-92.
- [8] Kilian J, Haala N, Englich M. Capture and evaluation of airborne laser scanner data [J]. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 1996, 31(B3): 383-388.
- [9] Lohmann P, Koch A, Schaeffer M. Approaches to the filtering of laser scanner data [J]. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2000, 33(B3): 540-547.
- [10] Zhang K Q, Chen S C, Whitman D, et al. 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.
- [11] Chen Q, Gong P, Baldocchl D, et al. Filtering airborne laser scanning data with morphological methods [J]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 2007, 73(2): 175-185.
- [12] Li Y, Wu H Y. DEM extraction from LIDAR data by morphological gradient[C]//Kook Y G, Lee J O. Proceedings of Fifth International Joint Conference on INC, IMS and IDC. Seoul: IEEE, 2009: 1301-1306.
- [13] Silván-Cárdenas J L, Wang L. A multi-resolution approach for filtering LiDAR altimetry data [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 2006, 61(1): 11-22.
- [14] 孙洪泉. 地质统计学及其应用[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1990: 96-103.
- Sun Hongquan. Applications of geostatistics [M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 1990: 96-103.
- [15] 李莉, 胡建平. 克里金插值算法在等高线绘制中的应用[J]. 天津城市建设学院学报, 2008, 14(1): 68-71.
- Li Li, Hu Jianping. *Journal of Tianjin Institute of Urban Construction*, 2008, 14(1): 68-71.
- [16] 张引, 李虹, 肖春虹, 等. 数字图像处理 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2009: 357-367.
- Zhang Yin, Li Hong, Xiao Chunhong, et al. Digital image processing[M]. Beijing: China Machine Press, 2009: 357-367.
- [17] 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.

(责任编辑 马宇红,朱宇)

· 学术动态 ·

## “2012 年全国博士生学术论坛 (系统科学)”征文

“2012 年全国博士生学术论坛(系统科学)”由国务院学位委员会办公室、教育部学位管理与研究生教育司主办,青岛大学承办,将于 2012 年 11 月 2—5 日在山东省青岛市召开。

征稿范围:(1) 一般系统理论;(2) 复杂系统分析;(3) 复杂网络;(4) 系统生物学与医学;(5) 经济社会系统分析;(6) 复杂行为系统;(7) 交通系统工程;(8) 系统建模与仿真;(9) 管理科学与工程;(10) 系统科学的应用与实践;(11) 信息科学与工程。

全文截稿日期:2012 年 10 月 12 日。

联系电话:0532-85953820。

电子邮箱: xtkxlt@qdu.edu.cn。

会议网站: <http://zdh.qdu.edu.cn/UploadFile/xitongkexue/index.htm>。