

文章编号:1001-1595(2009)05-0466-04

机载 LiDAR 数据滤波方法评述

黄先锋¹,李 卉²,王 潇¹,张 帆¹

1. 武汉大学 测绘遥感信息工程国家重点实验室,湖北 武汉 430079;2. 武汉大学 遥感信息工程学院,湖北 武汉 430079

Filter Algorithms of Airborne LiDAR Data: Review and Prospects

HUANG Xianfeng¹, LI Hui², WANG Xiao¹, ZHANG Fan¹

1. State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, Wuhan 430079, China; 2. School of Remote Sensing and Information Engineering, Wuhan University, Wuhan 430079, China

Abstract: Filter of airborne LiDAR data is a primary step of data processing. This paper reviews the literatures of filter algorithms from aspects of theory and performance. The morphology and interpolation-based methods are introduced especially. In addition, prospect is also given to provide references for future research.

Key words: airborne LiDAR; filter; review

摘 要: DEM 提取是机载 LiDAR 数据处理的基础问题,总结国内外 LiDAR 滤波方面的研究进展,定量分析算法的性能,着重分析形态学方法和基于内插的方法并指出两种算法的互补性,并总结展望,为后续相关研究提供参考。

关键词: 机载 LiDAR; 滤波; 综述

中图分类号: P237

文献标识码: A

基金项目: 国家自然科学基金(40701154); 国家 863 计划(SQ2006AA12Z108506)

1 引 言

机载激光扫描(简记 LiDAR)是一种新型测量技术,可快速获取高精度密集点阵数据,并得到广泛应用。仪器接收目标反射得到数字表面模型(DSM),除了地面点之外,还包含树木、建筑、桥梁、车辆等信息,数字高程模型(DEM)提取须剔除这些非地面点,获取真实 DEM,此过程与图像噪声滤除相近,常称为“滤波”。

2 滤波算法假设条件

LiDAR 滤波时,需建立一个规则用来区分地面点和非地面点,此规则即为滤波算法的假设条件。所有滤波算法都需要一个或者多个假设前提条件作为分类识别的依据,目前所用到的假设条件主要有: DSM 中非地面点高于地面,即:激光扫描得到的最低点是足够准确的地面点,几乎所有滤波算法都基于此前提; 地面坡度变化不会太大,自然地形坡度变化总在一定限度之内,不属于地形的地物坡度会超过这个限度^[1-3]。各种常用的假设条件总结如表 1,用于城市地区时,还需考虑人工目标的特性,例如建筑物、立交桥等边界会出现高程剧变,并有规则的几何特征等。

表 1 滤波算法的假设条件和问题

Tab. 1 Filter algorithm assumptions and the problems

编号	假设条件	存在问题
1	非地面点均高于地面点	由于粗差、多路径效应等,造成最低点并非理想地面点数据
2	激光点可穿透树林到达地面	植被非常密集地区,激光难以穿过树林
3	地形坡度不会过大	在平坦地区此假设有效,对坡度较大的山区,并不总是满足

3 滤波方法

DEM 提取的核心问题是如何从点阵的强度与距离信息出发,利用判别规则和假设建立数学模型,实现地面点和非地面点的判断。根据技术路线的差异,可分为三类:形态学方法、基于内插的方法和基于曲面约束的方法。各种算法中,一个基本问题是如何准确寻找初始地形点,有了初始地形点,就可以以此为基础寻找其他地形点。对此问题有两种思路:一是自下而上,从局部出发扩展到全局;另一种是自上而下,先获取大范围的粗糙地形,然后逐步细化到局部。形态学和基于内插的方法分别代表了这两类思想,也是较实用的两类方法。

3.1 形态学方法

LiDAR 滤波的形态学方法借鉴于栅格图像处理,1996年,Kilian用形态学开运算获取DEM^[4],随后,学者扩展了这方面的工作^[1,5]。通常,在局部区域设定一定大小的滤波窗口,利用形态学开运算,剔除高于地面的点,得到逼近地形的一个表面。该方法的好处是直观,且有现成的理论依据,缺点是算法易受到滤波窗口大小的影响,且不能很好地处理地形变化剧烈的区域。例如:若数据中存在小建筑物时,给定较小的滤波窗口即可剔除建筑物点,若建筑物面积较大,则需要设定较大的滤波窗口,而过大的滤波窗口在消除大建筑物点时,也会错误地将局部地形特征剔除,从而造成误分类。

因此,形态学滤波算法中,滤波窗口的选择非常重要。理想的窗口大小选择是根据局部区域中非地面点的大小而设定,但实际上构成非地面点目标的建筑物、桥梁等结构复杂形态多变,难以确定。因此,一种折中的办法是根据地形的起伏大小和高程变化自适应的进行滤波窗口调整^[5],另一种是借用多尺度滤波的思想,并采用逐渐增加滤波器窗口大小的方式进行滤波处理^[6],由于渐变窗口设定实际上融入了多尺度滤波的思想,具有很好的参考价值。

3.2 基于内插的滤波方法

这类方法的核心思想是通过一个较粗的起始DEM,逐步从备选数据点筛选并内插加密DEM达到分类的目的。其中线性预测和Axelsson提出的基于不规则三角网(TIN)加密滤波算法最为典型^[3]。

线性预测算法先确定一个粗糙的DEM,根据点到DEM的距离计算每个点的权值,保留权值大于给定阈值的点,并迭代加密DEM^[3,7]。Axelsson提出的不规则三角网(TIN)加密滤波算法在逻辑上与线性预测相似,先通过一些较低种子点生成一个稀疏TIN,然后考察每个点与TIN的距离,并逐层迭代加密^[2],该算法在城区和森林地区有较好的适用性,并用于商业软件TerraScan。

本质上,基于内插的滤波方法是一种逐步迭代逐层加密的方式进行数据分类,因此,计算过程存在误差累积,受到初始DEM影响较大,且每一层的迭代判断结果受到上一层的影响,如果上一层次的处理出现了错误,这种错误会导致下一层次的数据点类型判断出现错误。因此,初始DEM

的选择非常重要,需要在初值选择和判别规则方面考虑更加细致,如:根据坡度差异自适应调整阈值、增加断裂线(Break Line)判断等^[8-9]。

此方法原理清晰,计算简单,并能较好地处理地形起伏变化较大的山区,特别是具有大片树林的山区地形;其缺点就是容易导致过检测,并且对数据中存在的误差很敏感,尤其是LiDAR数据中低于地面的错误点会影响此类方法的结果,因此,在使用此类方法前,一般需要剔除数据中的粗差。

3.3 基于约束曲面的滤波方法

地面可以看作是一个连续且平缓变化的表面,所以,可用带限制条件的参数曲面约束分类,如:Snake样条曲面、正交多项式等^[10-11]。约束曲面计算过程中的曲面拟合具有抑制粗差的功能,通常不需要先剔除粗差。此方法过于强调地形的平缓变化,忽略了地形的复杂性,因此,在地形变化剧烈的山区会存在一定问题。由于曲面计算和分析计算量较大,此类算法的运行效率相对比较低。

4 滤波方法的评价

4.1 滤波结果的评价方法

为了评价滤波算法,2003年ISPRS小组选取15个地区不同类型的数据作为基准数据,人工对每个点进行分类,并建立了评价体系^[12]。标准测试数据:包含多种不同类型的数据,例如:山地、城市、桥梁、森林、河谷、部分数据缺失的平地(如图1)、地形变化剧烈的采石场(如图2)等。

分类误差评价:分类误差分为误检和漏检两种:Ⅰ类错误是地面点被错误地分类为非地面点;Ⅱ类则是非地面点被错误地分类为地面点,对Ⅰ、Ⅱ类误差加权求和可得到总错误率,来综合反映分类水平,Ⅰ类、Ⅱ类错误显示了算法的适应性,总错误率则反映算法的可行性^[1]。



图1 Samp41 原始数据图

Fig.1 Original test data of Sample41

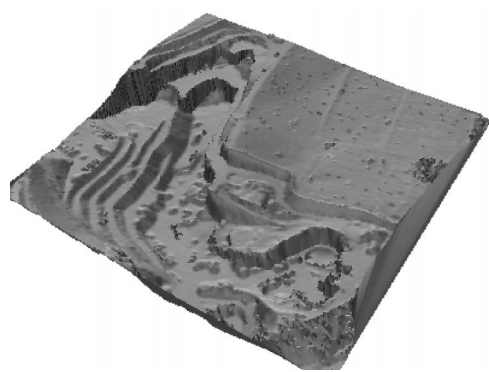


图 2 Samp53 原始数据图
Fig. 2 Original test data of Sample53

4.2 ISPRS 对比试验

基于测试数据,ISPRS 小组对其中 8 种方法

进行试验比较^[12],试验结果均由算法作者提交,客观可靠,结果如表 2。在平坦的乡村地区算法结果较好,但在地形起伏较大的地区,DEM 提取错误有所上升。在陡坡地带,地形高程变化较大,根据高程变化的判别算法容易导致误判。数据 Samp11、Samp23、Samp52、Samp53 等地形起伏较大,Axelsson 的内插滤波方法优于形态学方法,因为从粗到细的处理方式能避免大地形起伏导致距离计算值较大而引起的误判,尤其是数据 52 的内插方法和形态学方法的处理结果差异非常大。其中数据 53 (如图 2) 地形起伏变化大、陡坡陡坎多,分布少量植被,所有算法对此数据处理结果都较差,可见对复杂地表数据的判别上还有待研究提高。

表 2 9 种算法针对 15 个数据的处理结果表
Tab. 2 Results of 15 sample data with 9 filter algorithms

	Elmqvist	Sohn	Axelsson	Pfeifer	Brovelli	Roggero	Wack	Sithole	Chen(2007)
Samp11	22.40	20.49	10.76	17.35	36.96	20.80	24.02	23.25	13.92
Samp12	8.18	8.39	3.25	4.50	16.28	6.61	6.61	10.21	3.61
Samp21	8.53	8.80	4.25	2.57	9.30	9.84	4.55	7.76	2.28
Samp22	8.93	7.54	3.63	6.71	22.28	23.78	7.51	20.86	3.61
Samp23	12.28	9.84	4.00	8.22	27.80	23.20	10.97	22.71	9.05
Samp24	13.83	13.33	4.42	8.64	36.06	23.25	11.53	25.28	3.61
Samp31	5.34	6.39	4.78	1.80	12.92	2.14	2.21	3.15	1.27
Samp41	8.76	11.27	13.91	10.75	17.03	12.21	9.01	23.67	34.03
Samp42	3.68	1.78	1.62	2.64	6.38	4.20	3.54	3.85	2.20
Samp51	21.31	9.31	2.72	3.71	22.81	3.01	11.45	7.02	2.24
Samp52	57.95	12.04	3.07	19.64	45.56	9.78	23.83	27.53	11.52
Samp53	48.45	20.19	8.91	12.60	52.81	17.29	27.24	37.07	13.09
Samp54	21.26	5.68	3.23	5.47	23.89	4.96	7.63	6.33	2.91
Samp61	35.87	2.99	2.08	6.91	21.68	18.99	13.47	21.63	2.01
Samp71	34.22	2.20	1.63	8.85	34.98	5.11	16.97	21.83	3.04

注:表中前 8 种算法结果来自于 ISPRS 小组公布数据,Chen(2007)结果来自于其论文^[6]。可从 ISPRS 第 3 委员会网站查得

5 方法改进的可能性评述

滤波算法虽然研究较多,但缺乏真正高效、准确、适用性强的算法,相关研究仍有提高空间:

5.1 自适应阈值

阈值的选择对于滤波结果有很大的影响。阈值设定太大,可能保留一些低矮的地物目标,设定太小,则可能削平地形特征。现有的滤波方法中各种阈值的选取一般根据研究者的经验设定,或者根据地形特征设定的,没有考虑全局的特征因素,不具有普适性,可考虑自适应阈值设置。

5.2 综合形态学和内插的方法

两类算法各有优劣和针对性。从算法逻辑上

来看,基于内插的方法是一种从上而下的逻辑,形态学方法则是一种自下而上处理方式,因此,若综合利用这两种方法的特点,实现互补,有可能会实现具有一定突破。

5.3 多源数据互补融合

增加数据源可以提高对滤波过程的约束。可以利用诸如地图、CCD 影像、SAR 等多种数据源。例如,红外影像可确定植被区域和非植被地区,为阈值的选择提供参考;增加城市地图数据可防止低矮建筑物误判为地面等。

5.4 利用多回波以及原始波形信息

地面目标的激光回波与目标表面特征存在着一定的对应关系,不同的目标,会带来不同的回波

特性。对于斜坡地形,地面各点的回波延时是连续变化的,回波强度呈高斯分布;当存在房屋、树木等目标时,回波可能断裂成多个子波。可利用目标的波形特点,优化滤波算法。

5.5 结合智能科学发展新理论

随着计算机视觉研究的新进展,新的分类理论和技术不断提出,这些相关的新理论可以引入到LiDAR数据处理中来,为滤波处理提供有益的参考。例如:近年来进展比较突出的面向对象提取技术、机器学习技术等。

参考文献:

- [1] VOSSELMAN G. Slope Based Filtering of Laser Altimetry Data[J]. IAPRS, 2000, 33(B3/2): 935-942.
- [2] AXELSSON P E. DEM Generation from Laser Scanner Data Using Adaptive TIN Models[J]. IAPRS, 2000, 33(B4/1): 110-117.
- [3] KRAUS K, PFEIFER N. Determination of Terrain Models in Wooded Areas with ALS Data[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, 1998, 53: 193-203.
- [4] KILIAN J, HAALA N, ENGLISH M. Capture and Evaluation of Airborne Laser Scanner Data[J]. IAPRS, 1996, 31(B3): 383-388.
- [5] ZHANG K Q. 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.
- [6] CHEN Q. Filtering Airborne Laser Scanning Data with Morphological Methods[J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 2007, 73(2): 175-185.
- [7] KRAUS K, PFEIFER N. A New Method for Surface Reconstruction from Laser Scanner Data[J]. IAPRS, 1997, 32(2): 80-86.
- [8] LEE H S, YOUNAN N H. DTM Extraction of LiDAR Returns via Adaptive Processing[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2003, 41(9): 2063-2069.
- [9] SCHICKLER W, THORPE A. Surface Estimation Based on LiDAR[C]. Proceedings of the ASPRS Annual Conference. St Louis: [s.n.], 2001.
- [10] ELMQVIST M. Terrain Modelling & Analysis Using Laser Scanner Data[J]. IAPRS, 2001, 34(3/W4): 219-224.
- [11] BROVELLI M A, CANNATA M. Digital Terrain Model Reconstruction in Urban Areas from Airborne Laser Scanning Data: the Method and the Example of the Town of Pavia(Northern Italy)[J]. IAPRS, 2002, 34(2): 43-48.
- [12] 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:丛树平)

收稿日期: 2007-05-17

修回日期: 2009-05-08

第一作者简介: 黄先锋(1978—), 博士, 副教授, 从事LiDAR数据分析处理研究。E-mail: hxf_who@163.com
First author: HUANG Xianfeng (1978—), PhD, associate professor, majors in researches of LiDAR data processing. E-mail: hxf_who@163.com

欢迎订阅《测绘学报》

《测绘学报》创刊于1957年,是由中国科协主管,中国测绘学会主办的反映我国测绘科学技术发展水平的国家级综合性学术刊物,影响因子和被引频次居中文核心期刊测绘类前列,是美国《工程索引》(EI)核心期刊,并入选中国百种杰出学术期刊、2008年度中国精品科技期刊和中国科协精品科技期刊工程项目,是我国最具影响力的测绘期刊之一。

《测绘学报》发表中、英两种文字的论文;着重报道我国测绘科技最新的重要研究成果及其应用,内容涉及大地测量、工程测量、遥感、航空摄影测量、地图学、地理信息系统、矿山测量、海洋测绘、地籍测绘、地图印刷、测绘仪器、信息传输等测绘学科及其相关相邻学科。多次荣获中国科协的优秀学术期刊奖,被多个国际检索系统所收录。

《测绘学报》设有测绘快报、学术论文、博士论文摘要、博士后工作动态等栏目。

《测绘学报》(双月刊),定价:15.00元,邮发代号:2-224。

编辑部地址:北京复外三里河路50号,邮编:100045,电话:010-68531192(金英),010-68531317(兼传真)

本刊现已开通《测绘学报》网站: <http://xb.sinomaps.com>, 欢迎查询。