

基于最小二乘曲线拟合法的点云滤波算法研究

彭志^{①,②},李传荣^①,周梅^①

(^① 中国科学院光电研究院,北京 100190; ^② 中国科学院研究生院,北京 100049)

摘要:作为机载激光雷达数据处理的关键环节,激光雷达点云滤波一直是数据应用的重要前提和研究热点。本文充分考虑激光雷达通过线扫描获取数据的特点,并结合最小二乘曲线拟合法得到的拟合值具有跟随地形变化的特点,提出了一种最小二乘曲线拟合法用于点云滤波的算法。试验结果表明,该算法能获得准确的地形点,对地物复杂的城区及斜坡地区都有良好的滤波效果。

关键词:激光雷达;滤波;最小二乘曲线拟合法;扫描线

doi:10.3969/j.issn.1000-3177.2011.05.015

中图分类号:TP751 文献标识码:A 文章编号:1000-3177(2011)117-0086-04

Study on Filtering of Point Cloud Based on Least Squares Curve Fitting Method

PENG Zhi^{①,②}, LI Chuan-rong^①, ZHOU Mei^②

(^① Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049;

^② The Academy of Opto-Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190)

Abstract: As a key of airborne laser data processing, the filtering of point cloud has been an important prerequisite and research focus of data applications. Take a full account of data that obtained by line scanning, and combine the fitting values that obtained by least squares curve fitting the method can follow the change of terrain, therefore the method is applied to filtering of point cloud. The experimental results show that the filtering algorithm can obtain the true ground points, and has a good effect at complex urban and slope regions.

Key words: LiDAR; filtering; least squares curve fitting method; scan line

1 引言

激光雷达(LiDAR)作为一种快速获取地表及地面目标三维空间信息的主动式探测技术,通过记录发射和接收激光的时间差来计算反射物体与激光雷达之间的距离,从而计算出物体的三维坐标。机载激光雷达目前主要用于建立数字城市模型、交通管线的设计、电力线路的勘测设计、森林监管^[1]等方面。

对激光雷达点云数据进行滤波是建立数字地面模型以及分离建筑物、植被等其他地物的基础。目前已经有许多研究人员对点云数据滤波进行了研

究,现有的主要的滤波算法有移动窗口滤波法^[2]、迭代线性最小二乘内插法^[3]、数学形态学滤波^[4]、基于地形坡度滤波法^[5]和移动曲面拟合法^[6]、基于坡度一维双向标明法^[7]和伪扫描线法^[8]等。其中基于坡度的一维双向标明法利用坡度及高差的限差来区分地面点与非地面点;伪扫描线法是针对不同扫描方式的点云数据而提出的,先基于坡度的伪扫描线滤波法进行滤波处理,然后用移动窗口曲面拟合滤波方法进行调整,最终将地面点和非地面点分离。上述两种基于扫描线的滤波算法处理速度较快,在地势比较平坦的区域有较好的滤波效果,但对地形起

收稿日期:2010-08-17 修订日期:2010-10-13

基金项目:国家自然科学基金支持项目编号:40901177。

作者简介:彭志,男,中国科学院研究生院硕士研究生,主要研究方向是激光雷达数据处理。

E-mail: pengzhi@aoe.ac.cn

— 86 —

伏较大的区域效果不是很好。

为了有效解决上述两种基于扫描线滤波算法在地形起伏较大区域滤波效果不足等问题,本文基于点云数据按扫描线方式排列提出了一种新的滤波算法:首先利用最小二乘曲线拟合法得到拟合值,然后根据拟合值与实际高程值之间的差值来分离地面点与非地面点。试验表明,本文算法可以有效地从整个点云数据中提取出真实的地形,并能保留微小变化的地形点,从而得到完整的地形信息。

2 基于最小二乘曲线拟合法的滤波算法设计

本文算法直接处理激光雷达线扫描方式获取的原始点云数据,不需要进行极低点去除的预处理过程。在数学上,利用最小二乘曲线拟合法可以得到某点的拟合值,拟合值与实际值相比是存在偏差的,本文利用这个偏差来进行点云数据滤波。

2.1 扫描线分界点的确定

在滤波过程中,必须先确定一条扫描线与另外一条扫描线之间的分界位置,以便得到参与拟合点的数据。判断是否为分界点的方法是:根据原始数据的记录顺序,从第一个点开始,取每个点前后各 n 个点为一个区间,判断该点的 X (或 Y) 坐标值是否大于区间中的最大值或者小于区间中的最小值,以此来确定分界点的位置。在确定分界点位置的过程中,需要注意以下 3 个方面的内容:

- ①根据扫描线的方向来决定前后 n 个点坐标值是取 X 坐标还是取 Y 坐标;
- ②在原始数据起点和终点位置参与拟合点的个数会不足,则需要通过镜像扫描线中相应位置的值进行扩充以确保得到前后 n 个点的点的数据;
- ③ n 的取值跟点云数据的密度有关,若点云数据密度大,则 n 的取值也较大,一般来说,取前后各 50 个点可以满足滤波效果要求。

2.2 拟合值的获取

利用最小二乘曲线拟合法获取拟合值的方法如下:

(1)获取参与拟合的数据。参与拟合的数据为需要预测点的前后各 n 个点,即共 $2n+1$ 个点参与拟合。以参与拟合点的 X (或 Y) 坐标值作为计算的横坐标,以拟合点的 Z 坐标值作为计算的纵坐标;

(2)求取拟合值的公式如下^[9]:

$$P_m(x) = a_0 + a_1(x) + a_2(x)^2 + \dots + a_m(x)^m \quad (1)$$

为了防止运算溢出,将 x 用 $(x - \bar{x})$ 来代替,即:

$$P_m(x) = a_0 + a_1(x - \bar{x}) + a_2(x - \bar{x})^2$$

$$+ \dots + a_m(x - \bar{x})^m \quad (2)$$

其中: $a_0, a_1 \dots a_m$ 为拟合多项式的 m 个系数, $P_m(x)$ 为得到的拟合值, x 为拟合的横坐标, \bar{x} 为参与拟合点的横坐标平均值, m 为最小二乘法拟合多项式的次数。

利用最小二乘曲线拟合法得到的拟合值有以下两个特点:

- ①在平坦及斜坡区域,当仅存在地形点时,得到的拟合值与实际值会比较接近;
- ②在有地物区域,点的连续性会被中断,相对于地形点会存在一定突变,这样得到的拟合值与实际值之间的差值明显大于地形点之间的差值。

考虑到拟合值具有上述两个方面的特点,最小二乘曲线拟合法可以用于分离平坦以及斜坡地区的植被和建筑物。

2.3 高度阈值与拟合次数的设定

当参与拟合点个数增加时,一方面会增加计算时间;另一方面,当两点距离超过一定范围时,该点对拟合点的拟合值影响甚少。基于上述原因,本文算法中参与拟合点的个数一般不超过 100 个,拟合次数不超过 5 次。高度阈值的大小与拟合次数有关,当拟合次数较大时,高度阈值一般要设定一个较小的值,通常高度阈值设定为 1m 以下。

2.4 算法实现流程与步骤

按照最小二乘曲线拟合法得到每个点的拟合值,根据拟合值与实际值之间的差值来判定是否为地面点,并加入一个迭代过程以增加滤波算法的准确性。本文算法的流程如图 1 所示。

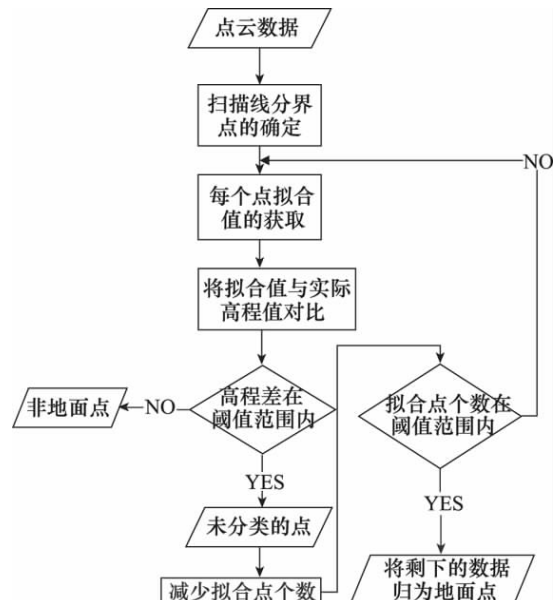


图 1 基于曲线拟合法处理流程图

算法的具体实现步骤如下:

(1) 计算并获取点云数据中扫描线之间的分界点;

(2) 利用最小二乘曲线拟合法计算并得到扫描线上某点的拟合值,用该点的实际高程值减去拟合值,若差值大于设定的高度阈值,则认为该点是非地面点;反之,则将该点归为未分类点;

(3) 减少拟合点的个数,若参与拟合点的个数大于设定的阈值,则将该扫描线上未分类的点重复第(2)步骤;

(4) 减少拟合点的个数,若参与拟合点的个数小于设定的阈值,将剩下未分类的点归为地面点;

(5) 依次对每条扫描线上的点进行步骤(2)~(4)的操作过程。

2.5 滤波结果优化调整

在森林地区,经过最小二乘曲线拟合法滤波后的结果会存在将非地面点划分为地面点的情况,因此提出利用格网的方法来解决这个问题。具体做法如下:

(1) 将整个点云数据按照一定的间隔进行格网划分,格网大小可以设置大些,如 $10\text{m} \times 10\text{m}$;

(2) 记录格网中最低点的高程值;

(3) 将格网中的点与最低点进行比较,超出一定阈值范围内的点则认为非地面点;

(4) 依次对所有格网进行(2),(3)步骤。

3 试验效果与分析

本文试验数据主要位于城区和郊区,并含少许山地,点间距为 0.3 m^2 ,总点数为 200 万。为验证算法的适用性,本文选择了其中的城区(树木较少,且地势平坦)、斜坡区域(坡度为 11.7°)和森林地区作为试验区域。考虑到目前商用软件中

TerraScan 最为成熟,应用范围最为广泛,将本文算法与 TerraScan 软件的滤波效果进行比较,TerraScan 软件中使用的滤波分类原理是 Axelsson(1999, 2000, 2001)的改进的不规则三角格网加密方法^[10]。试验效果图(图 2)中红色的点代表地面点,蓝色的点代表非地面点,图中绿色数字表示该区域内高程最大与最小值。

如图 2(a)所示,本文算法可以将城市区域中的建筑物点和植被点从地形中分离出来。如图 2(b)所示,TerraScan 软件将有微小变化的地形点误判为非地面点,而图 2(c)所示,本文算法可以很好地保留这一微小的地形特征,有助于建立更加精准的地表三维模型。

斜坡地形处理结果如图 3(a)所示,本文算法在能够很好地保留斜坡地形的同时,将斜坡上的建筑物及植被从地形中分离出来。从图 3(b)与图 3(c)的对比可以看出,在斜坡区域,本文的算法能保留微小变化的地形特征,而 TerraScan 出现误判点。

在对点云数据进行曲线拟合滤波算法后,经过 2.5 节优化调整后,森林地区处理结果如图 4(a)所示。从图 4(b)与图 4(c)的对比可以看出,本文算法可以比较好地保留植被覆盖下的地形点。

为了更加客观地评价基于最小二乘曲线拟合滤波算法的滤波效果,将本文滤波效果与真实的情况进行比较,真实的情况是由人工编辑分类来完成,同时将本文的滤波结果与 TerraScan 软件滤波结果进行比较,如表 1 所示。相比而言,在城区和森林地区,本文算法的错误点数明显少于 TerraScan 软件的错误点数;在斜坡地区,本文算法的滤波结果稍好于 TerraScan 的结果,并都能准确地将地物从地面点中分离出去。

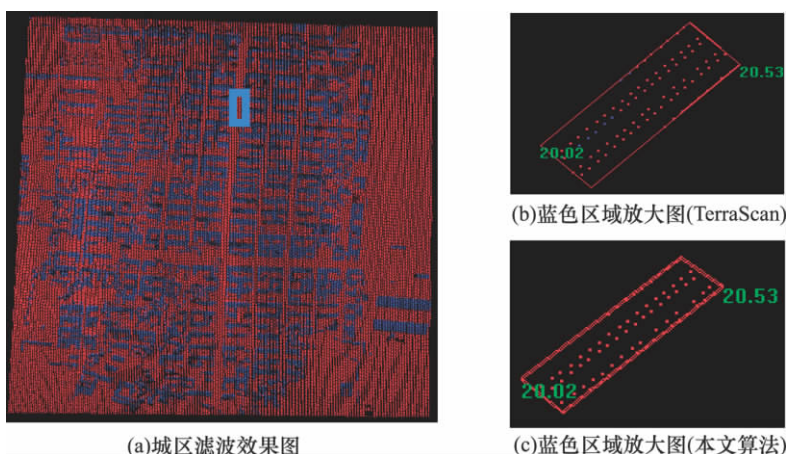


图 2 城区滤波效果图及局部放大图的对比

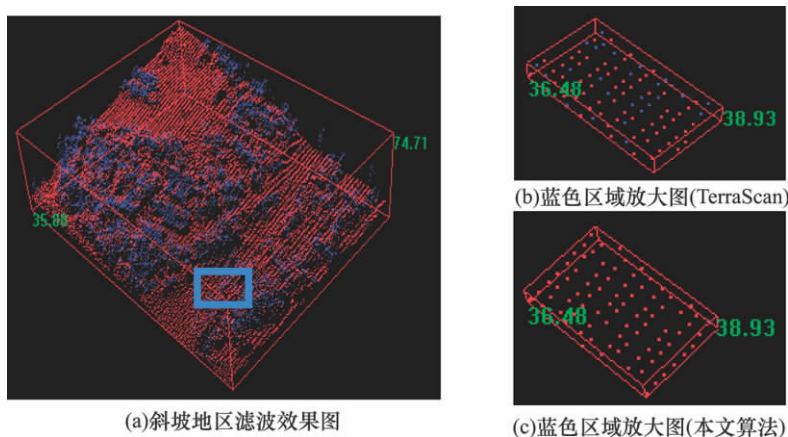


图3 斜坡地区滤波效果图及局部放大图的对比

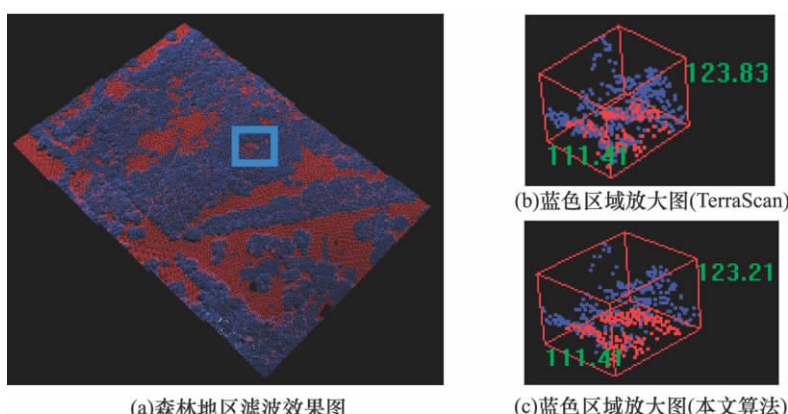


图4 森林地区滤波效果图及局部放大图的对比

表1 滤波精度统计对比表

地形类型	样本数量	地形点	地形点比	错误点数		引入误差	
				本文	TerraScan	本文	TerraScan
城区	131612	87374	66.38%	4239	15962	4.85%	18.27%
斜坡	21893	12643	57.75%	671	797	5.30%	6.30%
森林	111700	30220	27.05%	2973	16888	9.83%	55.8%

4 结束语

本文基于点云数据按扫描线方式排列提出了一种新的滤波算法,利用最小二乘曲线拟合法得到的拟合值可以反映地形的基本趋势,并利用地物的实际值大于拟合值的特点来区分地面点和非地面点。

试验结果表明,该算法可以较好地适用于城区、斜坡和森林等区域,并可以较快地进行激光雷达点云数据的滤波处理。由于建筑物中央区域得到的拟合值会接近实际值,因此该算法并不适用于处理大型建筑物区域,有待进一步的改进。

参考文献

- [1] 赵峰,李增元,等. 机载激光雷达(LiDAR)数据在森林资源调查中的应用综述[J]. 遥感信息,2008(1):106-110.
- [2] Bettina Petzold, Peter Reiss, Wolfgang Stossel. Laser scanning surveying and mapping agencies are using a new technique for the derivation of digital terrain models[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 1999(54):95-104.
- [3] 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.
- [4] Sui Lichun. Processing of laser scanner data and extraction of structure lines using methods of the image processing[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2004, 33(1):63-70.

(下转第 113 页)

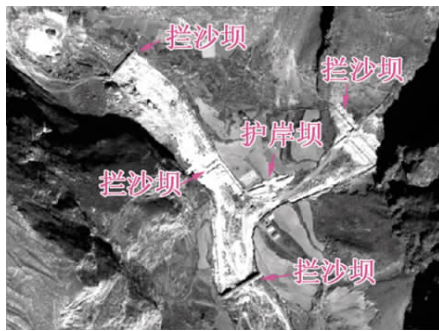


图6 大峪沟与小峪沟交汇处工程治理 WorldView-1 影像图

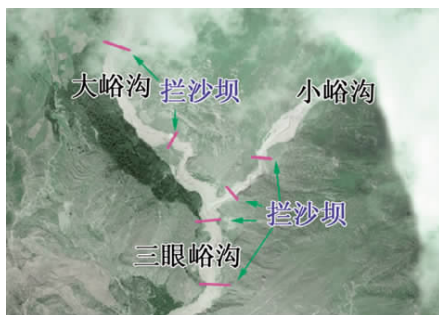


图7 大峪沟与小峪沟交汇处灾后航摄影像图

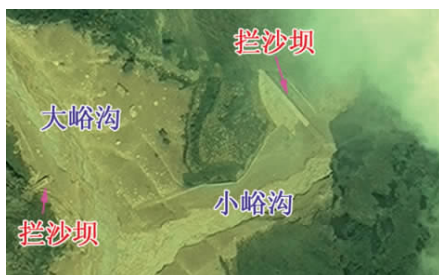


图8 大峪沟与小峪沟交汇处灾后 Quickbird 影像图

8 结束语

本文对舟曲县泥石流灾害发生的背景进行了调查,详尽分析了地形、地质和降水等泥石流的诱发因素:①灾害发生区为典型的高山峡谷地形,横断面呈“V”字型或窄深的“U”,沟道比降大,为泥石流易发地形;②舟曲属地震强烈活动区,区内构造十分复杂,断裂发育,褶皱强烈,岩体极为松动破碎,沟内碎屑物质极为丰富;③8月7日当日降雨量达96.77mm,23h~24时的1h内的降强达77.3mm,7日所降的暴雨直接触发了这起山洪泥石流灾害的发生。

根据灾后影像解译,三眼峪泥石流形成的碎屑堆积物总量为 $8.9 \times 10^5 \text{ m}^3$,为巨型规模;罗家峪泥石流形成的碎屑堆积物总量为 $3.2 \times 10^5 \text{ m}^3$,为大型规模。舟曲县8·7特大泥石流灾害共掩埋、冲毁234座平房(低于3层)、22栋楼房,估计死亡人数接近2000人,投资近1000万元的泥石流综合治理工程大部分被毁,本次泥石流形成的灾害为特大级地质灾害。从灾后影像图分析,治理工程减少了洪峰流量和泥沙冲出量,对减轻本次灾害的严重程度有一定作用。

本文在航空遥感调查的基础上,分析了泥石流沟的流域特征,泥石流的成因、成灾过程及若干重要参数,为今后此类重大泥石流灾害的防治提供了可资借鉴的依据。

参考文献

- [1] 王平,王殿琦,熊盛青,等. 飞向汶川——5·12地震灾害航空遥感调查[M]. 北京:科学出版社,2009.
- [2] 童立强.“5·12”汶川大地震极重灾区地震堰塞湖应急遥感调查[J]. 国土资源遥感,2008(3):61-63.
- [3] 王治华,杨日红,王毅. 秭归沙镇溪镇千将坪滑坡航空遥感调查[J]. 国土资源遥感,2003,57(3):5-9,53.
- [4] 马东涛,祁龙. 三眼峪沟泥石流灾害及其综合治理[J]. 水土保持通报,1997,17(4):26-31.

(上接第89页)

- [5] Vosselman G. Slope based filtering of laser altimetry data[C]//International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, 1997;32(3-4W2):19-26.
- [6] 张小红,刘经南. 机载激光扫描测高数据滤波[J]. 测绘科学,2004,28(6):50-53.
- [7] Sampath A. Urban modeling based on segmentation and regularization of airborne lidar point clouds[C]//International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, 2004(35):923-941.
- [8] 何正斌,田永瑞. 机载三维激光扫描点云非地面点剔除算法[J]. 大地测量与地球动力学,2009,29(4):97-101.
- [9] 徐士良. 常用算法程序集(c语言描述)第三版[M]. 北京:清华大学出版社,2004:224-229.
- [10] Axelsson P. DEM generation from laser scanner data using adaptive TIN models[C]//International Archives of the Photogrammetry, 2000,33(1):110-117.