

文章编号:1671-8860(2009)04-0459-04

文献标志码:A

基于机载 LiDAR 数据获取森林地区 DTM 新方法

唐菲菲^{1,2} 刘经南³ 张小红¹ 阮志敏⁴

(1 武汉大学测绘学院,武汉市珞喻路129号,430079)

(2 重庆大学土木工程学院,重庆市沙正街33号,400030)

(3 武汉大学卫星导航定位技术研究中心,武汉市珞喻路129号,430072)

(4 重庆交通科研设计院,重庆市南岸区五公里,400067)

摘要:提出了一种继承式多分辨率体素滤波算法,从机载激光扫描数据中获取森林地区的数字地面模型。该方法将激光点云数据划分为不同分辨率等级的体素,以体素为单位通过与邻域的体素的高程加权均值的比较,剔除植被点,保留地面点,从而获取森林地区的数字地面模型。通过将提出的滤波方法应用于实际采集数据,并与 Terrascan 的滤波结果进行比较验证该方法的有效性。

关键词:机载激光扫描;体素;继承式多分辨率;滤波;数字地面模型

中图法分类号:P228.3; P231.5

森林地区 DTM 的获取是测绘生产的重要任务之一。由于植被的遮挡和大面积阴影的存在,很难用数字摄影测量的方法获取森林地区的真实地形,而激光扫描技术以其能够在一定程度上穿透植被到达地面,直接获得目标的三维坐标特性,在获取森林地区的数字地面模型中取得了优势。通过对机载激光扫描数据进行滤波处理,滤除非地面点后剩下的地面点即可用于生成数字地面模型。对于通过滤波提取 DTM(digital terrain model,数字地面模型)有各种不同的方法,如数学形态学滤波^[1]、线性预测方法^[2]、不规则三角网渐进稠化^[3]、基于坡度的滤波方法^[4]、移动曲面拟合滤波^[5]、利用回波探测信息进行滤波^[6],滤波基于分等级的格网的滤波思想^[7]、灰值数学形态学重建算法^[8]以及重复插值算法^[9]。其中,一些算法被 Sithole 和 Vosselman^[10]进行了很好的分析和比较。

1 滤波算法

1.1 多次回波信息分析

通过对实际采集数据的回波分析发现,对于

植被比较密集的森林地区而言,单次回波多发生在较接近树冠部分或地面,而在多次回波中,首次回波多为接近树冠的部分的反射信号,末次回波一般是较树冠低一些的枝叶或地面的反射信号。因此,在以获取森林地区数字地面模型为目的的滤波算法设计中,以单次回波点和末次回波点的集合为基础进行地面点的提取。

1.2 体素的划分

机载激光扫描技术是直接获取被测目标的三维坐标信息,呈现为三维点云,将机载激光扫描得到的数据按照一定的体积大小划分成体素。

在本文提到的滤波方法中,体素的大小随着分辨率的增大而逐渐缩小。首次划分体素的依据由激光脚点的平均密度和设定的每个体素中所要含有的点的个数决定。首先将三维点云投影到 1 m×1 m 的格网中,统计每平方米的点的个数,记录平均点密度(P_{ave}),并计算出该点云数据中最高点与最低点的高程差($Z_{max} - Z_{min}$)。设定每个体素中至少要含有 m 个点,那么首次划分的体素的大小即为 $n \times n \times (Z_{max} - Z_{min})$ (单位为 m),其中 $n = m / P_{ave}$ 。

在低分辨率的体素中,可以将统计得到的各

收稿日期:2009-01-18。

项目来源:国家自然科学基金资助项目(40504001);武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室开放研究基金资助项目(重点项目子项目1)。

体素中点的个数作为剔除粗差的依据。由于首次划分的体素属于低分辨率等级,可以理解为在二维平面上覆盖了一定的面积,而粗差多体现为孤立点,那么对于低分辨率体素中只含有极少数点的情况可以认为是粗差予以剔除。

1.3 数字地面模型初始化

首先在各个体素内找出最低点作为数字地面模型种子点,然后计算出该体素内其余各点与最低点的高差以及坡度(图1)。设定阈值,小于阈值的点被接受作为初始的数字地面模型中的地面点。由于本文的滤波方法是以单次回波和末次回波点的集合作为滤波的基础数据,而单次回波点多位于靠近树冠(高程值较大)或地面(高程值较小),末次回波多位于植被中间层次或地面(高程值比较小)。对于某一体素内的最低点来说,植被点和地面点与最低点的高程差和坡度可以说基本呈现两极分化,植被点与最低点的高程差较大,坡度也较大,而地面点距最低点的高程差较小。基于这一分析,选取与最低点高差小于1 m或者高差大于1 m但与最低点坡度小于60°的点作为初始数字地面模型中的地面点。高差1 m和坡度60°的阈值分别被Hyppä^[10]和Kobler^[8]的滤波算法选为阈值。笔者将两者结合起来作为本算法选取初始化DTM的阈值。

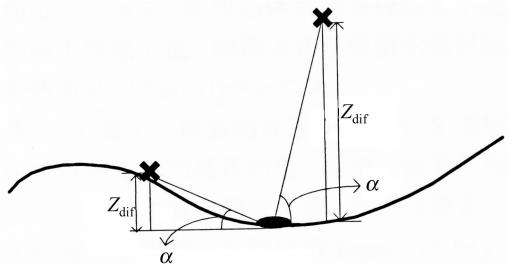


图1 Z_{dif} 和 α 分别为各点(用×表示)与最低点(由▲表示)的高差和坡度

Fig. 1 Z_{dif} and α Represents the Height Difference and Slope Between the Points (×) and the Lowest Points (▲) Respectively

1.4 继承式多分辨率滤波

在通过体素的高程加权均值进行滤波的过程中有以下3个关键问题:①分辨率等级;②体素的高程均值的计算,应该以最能代表该体素高程特征的计算方法来计算其高程均值;③用于和中心体素进行比较的结构体素的选取。

针对以上3个关键问题,笔者设计了一种继承式多分辨率滤波算法。所谓多分辨率,即滤波的过程中将激光点云数据划分为不同分辨率的体

素,由较低分辨率体素开始,逐步细化至较高分辨率体素,如从 $10 \text{ m} \times 10 \text{ m} \times (Z_{\text{max}} - Z_{\text{min}})$ 的体素开始至 $1 \text{ m} \times 1 \text{ m} \times (Z_{\text{max}} - Z_{\text{min}})$ 分多个分辨率等级对激光点云数据进行滤波。所谓继承式,即各分辨率体素滤波之间的结果并不是独立的,而是存在关联性,上一个分辨率等级的滤波结果是下一个分辨率等级的滤波初始值。通过不断缩小体素,从而不断精确滤波结果。

关于体素均值的计算,采用加权平均的方法。对于权重的分配,最重要的是要明确体素中各激光脚点的重要性。显然,对于滤波来说,其目的是剔除植被点,保留高地面点,而植被点的高程值一般比较大,地面点的高程值比较小。那么以体素中的最低点为基准,与最低点高差越大,该点所占的权重越重,相反则越小。基于这一考虑,体素高程均值为:

$$Z_{\text{ave}} = \frac{\sum_{i=1}^j (Z_i * W_i)}{\sum_{i=1}^j W_i} \quad (1)$$

其中, Z_i 为体素中某一激光脚点高程; i 为体素中激光脚点的总数; W_i 为该点的权重:

$$W_i = \frac{Z_i - Z_{\text{min}_i}}{Z_{\text{max}_i} - Z_{\text{min}_i}} \quad (2)$$

式中, Z_{min_i} 和 Z_{max_i} 分别为该体素内激光脚点的高程最小和最大值。

2 实例

2.1 原始数据

本文中使用的试验数据是位于美国华盛顿州西部的一片以针叶林为主的森林区域的一部分,树龄从幼林到70 a成熟林不等。机载激光扫描数据的采集设备为TopEye激光扫描系统,数据采集于1999年。原始激光扫描数据点密度为2.6个点/ m^2 ,每条数据记录中包含激光脉冲编号、回波次数、三维坐标值X、Y、Z以及强度信息,最多记录了4次回波信息。原始数据浮雕图如图2所示。

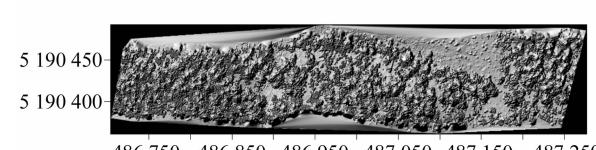


图2 原始数据浮雕图

Fig. 2 Relief for Raw Data

2.2 试验结果

通过统计, 初始滤波数据集, 即首次回波与末次回波数据的集合的平均点密度为 1.26 点/m², 最低点与最高点高程差为 119.75 m。根据上述体素划分方法, 设定每个体素中最少含有 10 个点, 则初始体素大小应为 10 m × 10 m × 120 m。将激光点云划分到相应的体素中, 初始化后的 DTM 如图 3 所示。

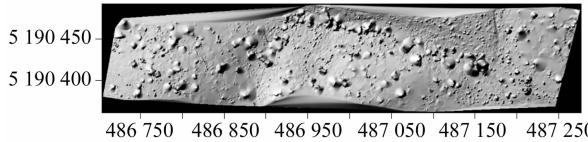


图 3 初始化 DTM 浮雕图

Fig. 3 Relief for Initialized DTM

分别对试验数据采用 10 m、5 m 以及 2 m 的继承式多分辨率滤波, 其滤波结果如图 4~图 6。图 6 为滤波结束后得到的地面点内插后的 TIN。

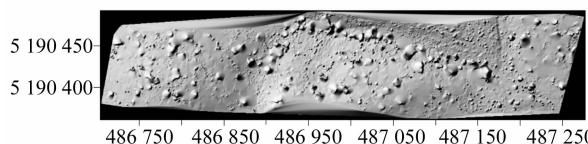


图 4 10 m 分辨率滤波结果浮雕图

Fig. 4 Relief for 10 m Resolution Filtering Result

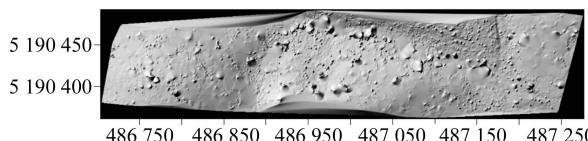


图 5 5 m 分辨率滤波结果浮雕图

Fig. 5 Relief for 5 m Resolution Filtering Result

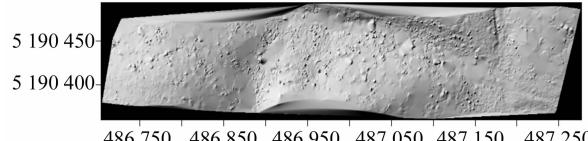
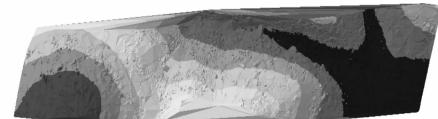


图 6 2 m 分辨率滤波结果浮雕图

Fig. 6 Relief for 2 m Resolution Filtering Result

2.3 与 Terrascan 的比较

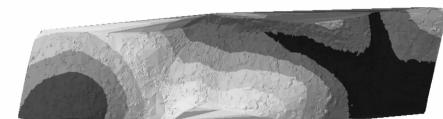
由于没有实地参考数据, 将该试验结果与利用 Terrasolid 公司出品的滤波数据处理软件得到滤波结果进行了对比。该软件采用的是 Axelson 的不规则三角网渐进稠化的算法。图 7 和图 8 为 Terrascan 滤波得到的处理结果, 表 1、表 2 为两种滤波方法的结果统计。



■ 298.759~307.337 ■ 273.025~281.603 ■ 247.290~255.868
■ 290.181~298.759 ■ 264.446~273.025 ■ 238.712~247.290
■ 281.603~290.181 ■ 255.868~264.446 ■ 230.134~238.712

图 7 滤波得到的地面点内插后的 TIN

Fig. 7 TIN for Terrain, Elevation Increased



■ 298.29~306.81 ■ 272.73~281.25 ■ 247.17~255.69
■ 289.77~298.29 ■ 264.21~272.73 ■ 238.65~247.17
■ 281.25~289.77 ■ 255.69~264.21 ■ 230.13~238.65

图 8 Terrascan 滤波得到的地面点内插后的 TIN

Fig. 8 TIN for Terrain from Terrascan, Elevation

表 1 本文方法与 Terrascan 的滤波结果统计

Tab. 1 Results of Algorithm in this Paper and Terrascan

	参与滤波的激光脚点个数	滤波后得到的地 面点个数
继承式多分辨率滤波	70 855	31 318
Terrascan	100 000	32 549

表 2 本文方法与 Terrascan 滤波得到的地面点和植被点数量比较

Tab. 2 Number of Terrain and Vegetation Points Extracted by Algorithm in this Paper and Terrascan Respectively

	继承式多分辨率滤波	
	地面点	植被点
Terrascan	29 775	1 543
	植被点	2 774

以 Terrascan 的滤波结果作为参考数据, 本文方法中只有单次回波和末次回波点参与滤波, 使用的激光脚点数量明显少于 Terrascan, 但是滤波得到的地面点个数却相当。本文滤波结果中有 2 774 个地面点在 Terrascan 中被认为是植被点, 有 1 543 个植被点在 Terrascan 中被认为是地面点。

根据 ISPRS2003 年的滤波算法评价报告, 滤波算法的质量可由第一类误差, 即地面点被错误分类为地物点的误差, 和第二类误差, 即地物点被当作地面点的误差的形式来体现。两类误差的计算方法如下:

$$\text{第一类误差} = \frac{b}{a+b} \times 100\% \quad (3)$$

$$\text{第二类误差} = \frac{c}{c+d} \times 100\% \quad (4)$$

式中, a 为被正确分类的地物点; b 为被错误分类为地物点的地物点; c 为被错误分类为地物点的地物点; d 为被正确分类的地物点。利用本文滤波算法, 第一类误差和第二类误差分别为 4.93% 和 4.03%。

参 考 文 献

- [1] Kilian J, Haala N, Englisch M. Capture and Evaluation of Airborne Laser Scanner Data[C]. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vienna, Austria, 1996
- [2] Kraus K, Pfeifer N. Determination of Terrain Models in Wooded Area with Airborne Laser Scanner Data[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, 1998, 53: 193-203
- [3] Axelsson P. Processing of Laser Scanner Data Algorithms and Applications[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 1999, 54: 138-147
- [4] Vosselman G. Slope Based Filtering of Laser Altimetry Data[C]. IAPRS, Amsterdam, The Netherlands, 2000
- [5] 张小红. 机载激光扫描测高数据滤波及地物提取[D]. 武汉: 武汉大学, 2002
- [6] 许晓东, 张小红, 程世来. 航空 Lidar 的多次回波探测方法及其在滤波中的应用[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2007, 32(9): 778-781
- [7] Wack R, Wimmer A. Digital Terrain Models from Airborne Laser Scanner Data A Grid Based Approach[C]. IAPRS, ISPRS Commission III, Symposium, Graz, Austria, 2002
- [8] Arefi H, Hahn M. A Morphological Reconstruction Algorithm for Separation Off-terrain Points from Terrain Points in Laser Scanning Data[C]. ISPRS WG III/3, III/4, V/3 Workshop, Laser scanning 2005, Enschede, the Netherlands, 2005
- [9] Kobler A, Ogrinc P. REIN Algorithm and the Influence of Point Cloud Density on NDSM and DEM Precision in a Submediterranean Forest[C]. ISPRS Workshop on Laser Scanning 2007 and SilviLaser 2007, Espoo, Finland, 2007
- [10] Sithole G, Vosselman G. Comparison of Filtering Algorithms[C]. ISPRS Commission III, Working Group 3, Dresden, Germany, 2003

第一作者简介: 唐菲菲, 博士生。主要研究方向为机载 LiDAR 技术在森林地区的应用。

E-mail: fftang80@126.com

Derivation of Digital Terrain Model from Airborne LiDAR Data in Forestry Area

TANG Feifei^{1,2} LIU Jingnan³ ZHANG Xiaohong¹ RUAN Zhimin⁴

(1) School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan 430079, China)

(2) School of Civil Engineering, Chongqing University, 33 Shazheng Street, Chongqing 400030, China)

(3) Research Center of GNSS, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan 430079, China)

(4) Chongqing Communication Research & Design Institute, Five Kilometers, Chongqing 400067, China)

Abstract: An inherited multiresolution voxel-based filtering algorithm, aiming at deriving the digital terrain model in forestry area, is proposed in this paper. In this new method, the laser scanning data are divided into voxels at different resolutions. by comparing the weighted average height with neighbors, vegetations in voxels are rejected and terrain points are retained to be interpolated into a digital terrain model. This algorithm is proven to be practical by applying it on the actual data and comparison with the filtering results of Terrascan.

Key words: airborne laser scanning; voxel; inherited multiresolution; filtering; DTM

About the first author: TANG Feifei, Ph.D candidate. Her major interest is the application of airborne LiDAR data in forestry area.

E-mail: fftang80@126.com