

基于等高线的表面估计滤波方法

任自珍¹, 岑敏仪¹, 张同刚¹, 周国清²

1. 西南交通大学 土木工程学院, 四川 成都 610031

2. Department of Engineering and Technology, Old Dominion University, Norfolk Virginia 23529, USA

摘要: 提出一种基于等高线的滤波方法, 它先由 LIDAR数据生成数字表面模型, 并内插出等高线, 再根据 DSM等高线的特征, 如闭合性、首尾点距离、等高线的长度及等高线间距离等, 通过设定阈值自动提取出属于自然地面的等高线线段, 以获得初始的自然地面点, 然后内插生成初始数字地面模型, 最后使用迭代逼近法生成最终的(精确的)数字地面模型, 即比较初始 DIM与 DSM, 差值小于预设阈值的点视为 DIM点, 而差值大于预设阈值的点则标记为无数据点, 最后, 这些无数据点由选择的 DIM点内插出。通过与现有表面估计的滤波方法的对比实验以及所提取地物轮廓线与航片的叠加对比试验, 证明新方法可适用于地表起伏较大的地形, 地物提取精度高、计算量小、效率高。

关键词: 激光雷达, 滤波, 等高线, 数字表面模型, 数字地面模型

中图分类号: P237 **文献标识码:** A

1 引言

激光雷达 (light detection and ranging, LIDAR) 是近年来出现的一种高新技术系统, 它整合了 3 种高技术: 激光测距、高精度惯性测量系统 (IMU) 和全球定位系统 (GPS), 可以直接获取地球表面或在其上目标的三维数据。LIDAR系统采用激光作为传感的载体, 不依赖太阳光照, 是一个先进的主动传感系统, 可以全天时获取信息 (李英成等, 2002)。比较传统测量方法, LIDAR系统获取的数据具有高精度、高密度、高效率 and 成本低的优点, 已成为获取三维信息, 尤其是数字地形模型 (DTM) 的一个非常有效的工具 (Kraus & Pfeifer, 2001)。

滤波是从 LIDAR数据提取 DIM的一种主要方法, 其目的是把雷达激光脚点分为地面上的点和非地面上的点。现有的滤波方法很多, 其中数学形态学和表面估计方法是比较常用的 2 类方法。数学形态学方法通过高差判断激光脚点的属性 (Kilian et al., 1996; Lohmann et al., 2000; Sithole, 2001), 它主要适用于平坦的城区, 已取得较好的应用效果, 但也存在一些不足 (梁欣廉等, 2007), 如在地形起伏区域结构元尺寸难以确定, 虽可采用动态调

整结构元尺寸 (Kilian, 1996) 或是自适应滤波方法进行改善, 但无疑增加了计算的难度和复杂度。

表面估计方法主要是通过迭代过程更新当前 DIM, 直至计算收敛得到地面点 (Masaharu & Ohtsubo, 2002; Akei et al., 2003; 张小红, 2002)。这种方法不需要确定结构元尺寸, 因而较形态学滤波易于实现, 其关键在于初始 DIM的生成, 如 Masaharu将地形表面分割成许多小的区域并选择每个区域的最低点, 利用这些最低点周围缓冲区的统计特征去掉一些可能为非地面点的最低点, 利用这些最低点内插生成初始 DIM (Masaharu & Ohtsubo, 2002)。该方法可适用于复杂但平坦的区域, 在地形起伏区域, 仅利用这些高度信息和统计信息难以保证所选择的最低点都是地面点, 从而难以保证初始 DIM中无地物点存在, 也就难以保证最终 DIM的精度; Akei以道路网作为种子点得到初始 DIM (Akei et al., 2003), 它适用于有道路网存在且分布均匀的表面, 由于道路提取本身就是一件困难的事情, 因而在应用上存在一定的困难。

为此, 提出一种新的能够适用于地形起伏区域、不需要有均匀分布的道路网存在的表面估计滤波方法。该方法利用等高线特征从 DSM中找出部分地面上的点并生成初始 DIM, 故称之为基于等高

收稿日期: 2007-10-10 修订日期: 2008-02-27

第一作者简介: 任自珍 (1971—), 女, 四川成都人, 西南交通大学博士研究生。主要研究方向: LIDAR数据滤波及地物提取。

线的表面估计滤波法。

2 基于等高线的表面估计滤波方法

为了便于方法的叙述,在方法介绍前先对一些概念进行约定。对于任意一个点,根据其所在位置进行区分,如果这个点在地面上,则称该点为地面点;如果这个点在植被上或建筑物上,则称该点为地物点。对于任意一条等高线,如果组成该等高线的一系列点都是地面点,则称该等高线为地面等高线;如果这些点都是地物点,则称该等高线为地物等高线;如果这些点中一部分是地面点,一部分是地物点,则称该等高线为混合等高线,地面点组成的线段称为地面等高线段,地物点组成的线段称为地物等高线段。

由 LIDAR数据可以得到高精度的数字表面模型(DSM),在 DSM中不仅包含了地面点,也包含了建筑物和植被等地物点,因此,DSM生成的等高线也包含了地面等高线、地物等高线以及混合等高线。如果能够利用等高线的特征,从 DSM等高线中提取出地面等高线,从混合等高线中提取出地面等高线段,那么就可以得到一些地面点,进而可得到初始 DIM,经迭代处理后得到最终(精确的)DIM。基于等高线的表面估计滤波方法正是遵循这一思想。

2.1 等高线特征

将 DSM提取的等高线与该区域的航空像片进行叠加(图 1),可以清楚地看出,地物点和地面点在等高线上有如下特征:

(1)闭合性。理论上等高线应该是闭合的,但在一定的区域范围内,只有非图像边缘的地物等高线(如图 1中区域 1和 2)和山峰或低谷处的地面等高线呈明显的闭合状态,大部分的地面等高线和混合等高线呈现出非闭合的状态(如图 1中的区域 3),而图像边缘的地物等高线,由于图幅裁剪的原因,被人为截断也形成不闭合等高线(如图 1中的区域 4)。

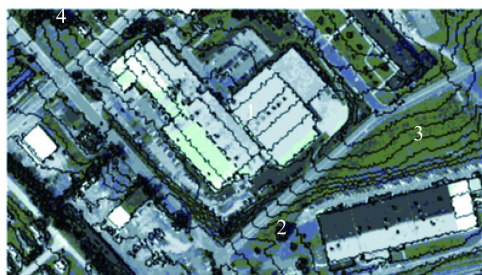


图 1 叠加 DSM等高线的航片

Fig 1 Aerial Photograph with contours of DSM

(2)曲线长。地物通常是远高于周围地面的,且有一定的范围,所以地物等高线的曲线长一般比较短;而除了突起的山峰或凹陷的低谷外,地面通常较平缓 and 范围较大,因而地面等高线和混合等高线的曲线一般比较长。

(3)首尾点距离。图像边缘处的地物等高线虽然不闭合,但由于地物范围较小,等高线首尾点距离也较小,如不会大于该地物范围的直径;非闭合的地面等高线和混合等高线,其等高线首尾点距离相对较大,通常远远大于一般地物的直径。

(4)密集性。一般人工地物远远高于地面,如建筑物大多与地面垂直,这时的地物等高线或混合等高线中地物等高线(段)通常比较密集,相对而言,地面等高线或是混合等高线中的地面等高线段则比较稀疏。

2.2 初始 DIM的生成

利用上述等高线特征,可将 DSM等高线中的地物等高线和混合等高线中的地物等高线段去掉,得到地面等高线和混合等高线中的地面等高线段,从而获得一些地面点以生成初始 DIM。具体步骤如下:

(1) DSM等高线的生成。DSM等高线的获取可直接利用 LIDAR的原始激光脚点,也可利用内插后的规则 DSM点,为了便于计算机进行处理,本文采用规则网格的 DSM。虽然 DSM内插会对 DSM等高线的精度有些影响,但由于初始 DIM精度要求不需太高,它能获得大部分的地面点数据即可完成任务,而高精度 DIM将在后续处理中获得,那才是决定精度的关键;但是,在初始 DIM生成中,获取的地面点的准确率必须是 100%,如有遗漏的地物等高线,将会影响最终 DIM的精度,但剔除过多的地面点也会影响后续处理的效率和运算时间。DSM内插对地面点获取的准确度没有影响,这是因为,DSM内插不准确性主要有两种情况,一种是地物点被内插成地面点,这与 DIM生成根本相一致;一种是地面点被内插成地物点,这将在处理中被作为地物点而去掉;因而这两种情况对地面点获取的准确性影响不大。内插时可选择现有的任一种内插方法,如线性内插法、反距离权重法、最近距离法等,本文采用最近距离内插法。

(2)地物等高线的去除。首先,利用等高线的闭合性去掉非边缘的地物等高线,即去掉闭合等高线,保留非闭合等高线。等高线的闭合性判断可利

用等高线首尾点坐标进行, 如果首尾点坐标相同, 表明该两点是同一点, 等高线是闭合的, 如果首尾点不相同, 则表明该两点不是同一个点, 该等高线是非闭合的。其次, 利用等高线的长度和首尾点距离等参数去掉图像边缘处的地物等高线, 即计算各剩余等高线的长度和首尾点距离, 去掉小于阈值的等高线, 保留大于阈值的等高线。等高线的长度可利用等高线各线段和来计算。长度阈值和首尾点距离阈值根据边缘处的最大地物的周长和半径来确定, 由于地物比较复杂, 其中不仅包含了建筑物, 也包含了独立的植被和成群的植被, 其范围也各有不同, 裁剪的程度也不同, 难以确定一个合适的阈值将所有边缘处的地物等高线去掉。但如果在数据裁剪的时候能够避开大的建筑物和植被群, 就可按一般建筑物的尺寸选取阈值去掉大部分的地物等高线, 余下一小部分在后续处理中去掉。如首尾点距离阈值可选取为一般建筑物的宽度, 长度阈值选取为最小建筑物周长的 3/4 倍, 一般建筑物的尺寸为 $6\text{m} \times 6\text{m}$ 。

(3) 密集性检查。经过上一步处理后, 在剩余的等高线中, 除了混合等高线中的地物等高线段需要去除, 还有可能残存一些地物等高线需要去除。为了去掉这些剩余的地物等高线(段), 可利用等高线的密集性进行最终的检查, 即分段计算某等高线与其他等高线的线间距离, 如果小于预设的阈值, 则认为该段等高线是地物等高线段而去掉。等高线间的距离阈值为等高距和研究区域地面最大坡度的比值。

(4) 内插地面等高线(段), 生成初始 DIM

2.3 最终 DIM 的生成

在初始 DIM 生成过程中, 一些山峰或山谷等高线由于闭合被当作地物等高线而去掉, 造成初始 DIM 出现山峰被削平或是山谷被填平的现象, 为了恢复这些点, 可采用迭代逼近方法生成最终的 DIM, 具体流程如下 (Masaharu & Ohtsubo, 2002):

- (1) 设当前地面点总数为零 ($n = 0$);
- (2) 将初始 DIM 作为当前的 DIM (DIM^0);
- (3) 比较 DIM^0 中任一点的高程值与对应的 DSM 高程值, 如果高差小于预设的高差阈值 Δh 则认为该点是地面点, 将该点的 DSM 高程值作为新的 DIM (DIM^1) 高程值; 如果高差大于阈值, 则认为该点是地物点, 将该点的 DIM^1 高程值设为无数据;
- (4) 统计 DIM^1 中所有地面点点数 n_1 , 计算地

面点增加的点数 Δn ($\Delta n = n_2 - n_1$), 如果 Δn 小于一个预设的阈值 (如 100), 则停止迭代, 并将 DIM^0 作为最终 DIM 输出。否则, 采用最近距离法, 由有数据的 DIM^1 点内插出所有的无数据点, 重新生成 DIM^1 。

(5) 把 DIM^1 作为 DIM^0 , 令 $n = n_2$ 返回 3)。

3 实验与结果

3.1 实验数据

本次实验使用的 LIDAR 数据是 2000 年 10 月由 Optech 1210 LIDAR 系统获得的, 实验区位于美国弗吉尼亚州的 Wytheville, 面积为 $1200\text{m} \times 420\text{m}$, LIDAR 数据的精度为 0.6m 。图 2 为采用最近距离法内插生成的试验区 DSM, 网格间隔为 0.6m 。从图 2 中可以看出, 区域左面的建筑物比较稀少, 植被较多; 区域右面植被较少, 有几个大的建筑物; 整个区域的道路网分布不均匀。图 3 为该试验区的纵横向断面图, 断面图显示该实验区横向地形起伏较大, 纵向为一个斜坡。

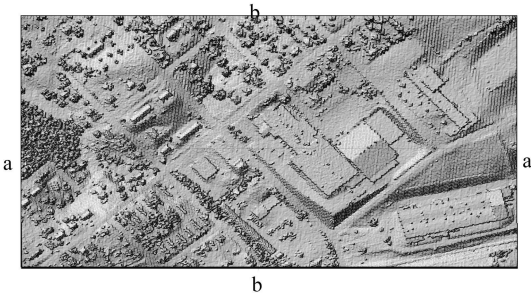


图 2 试验区 DSM
Fig 2 Experimental DSM

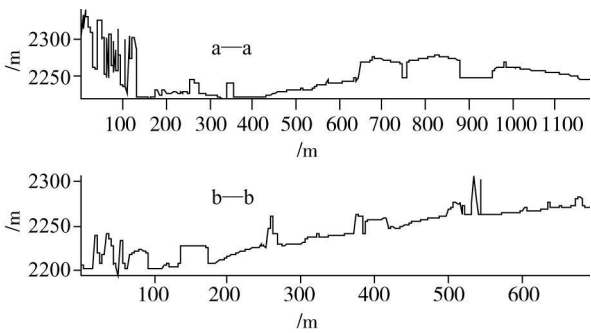


图 3 DSM 剖面图
Fig 3 Profiles of DSM

3.2 实验结果

采用本文所提滤波方法提取该区域的 DIM, 为

了清楚起见,列出一些中间结果。图 4(a)为实验区 DSM等高线,图 4(b)为提取的没有经过密集性检

查的地面等高线,图 4(c)为经过密集性检查后的地面等高线,等高距均为 1.5m。

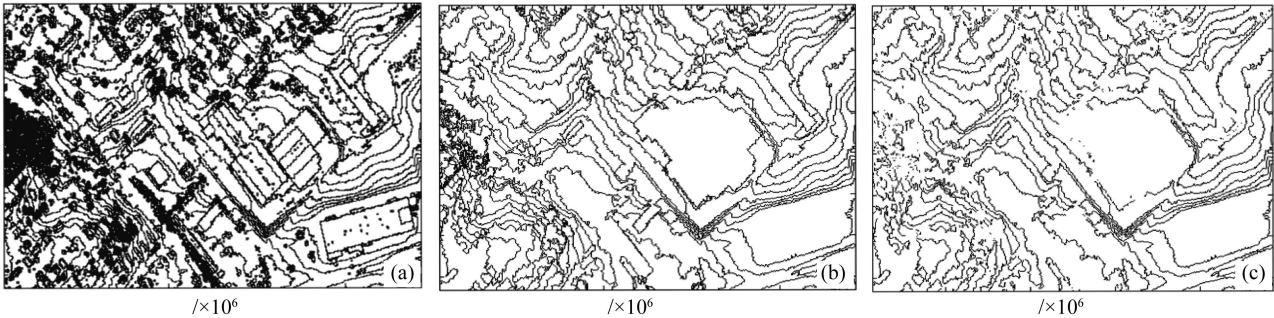


图 4 等高线
Fig 4 Contours

比较图 4(a)和 4(b)可以看出,利用等高线的闭合性、长度和首尾点距离等参数,去掉了大部分的地物等高线,但仍有少部分区域的地面等高线显得比较密集,主要是边缘处一些大的连成片的地物以及房屋基础轮廓等地方,经过等高线密集性检查后(图 4(c)),这些地方的等高线变得不连续,但密集性得到明显改善。

等高线内插生成的初始 DIM,图 6(a)和 6(b)分别是 5(a)和 5(b)迭代生成的最终 DIM。在迭代过程中高差阈值为 $\Delta h=0.1\text{m}$ 。从图 5 图 6 中可以看出,无论是初始 DIM,还是最终 DIM,如果在前期的处理中没有经过等高线的密集性检查,那么图像边缘的一些地物以及一些房屋基础将不会被完全去掉, DIM 的准确性受到影响,而经过等高线的密集性检查后, DIM 的准确性得到明显的提高,没有明显的地物存在。

图 5(a)和 5(b)分别是由密集性检查前后的地面

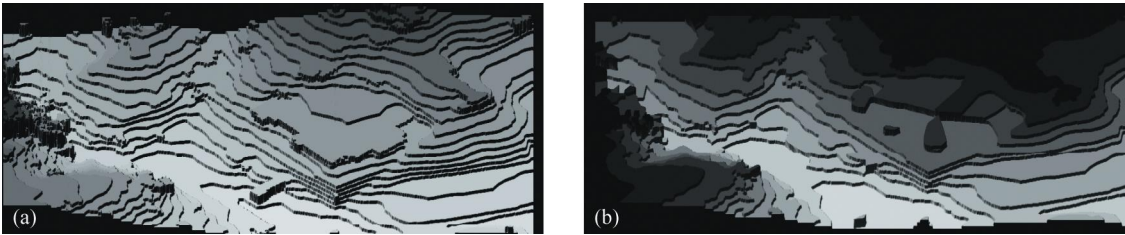


图 5 初始 DIM 的表面图
Fig 5 Surfaces of initial DIM

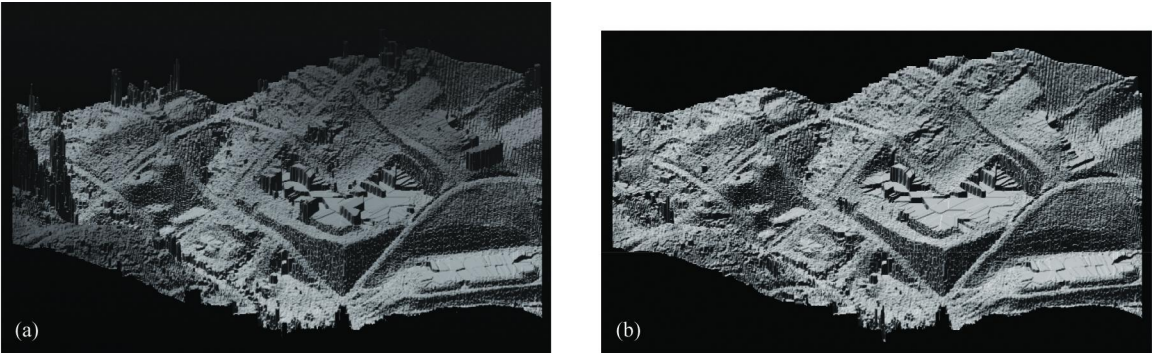


图 6 最终 DIM 的表面图
Fig 6 Surfaces of refined DIM

3.3 结果分析

(1) 与现有表面估计滤波方法比较

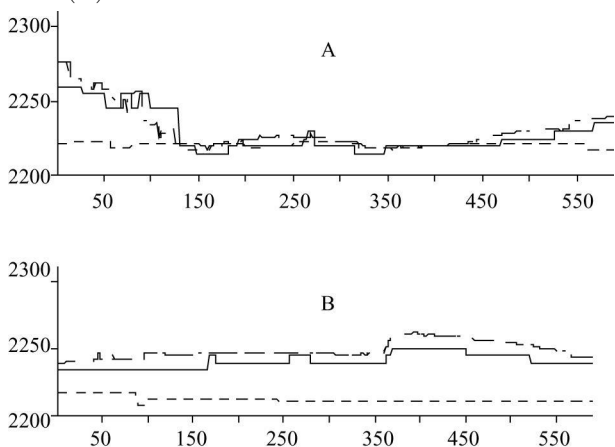


图 7 两种方法 a-a 断面比较图

Fig 7 Comparison of a-a profiles obtained by two methods

前面介绍了 Masaharu 所提出的表面估计方法 (Masaharu & Ohtsubo, 2002), 在这一节中, 本文将这两种方法进行对比试验。首先, 按照区域特征的不同将 DSM 分为左右两部分 (A 和 B), 然后采用文献 (7) 中的方法 (方法 1) 和本文提出的方法 (方法 2) 分别生成初始 DTM, 最后采用统一的迭代方法生成最终 DTM。图 7 是这两种方法提取的初始 DTM 和最终 DTM 断面 (a-a) 比较图, 其中, 虚线为方法 1 提取的初始 DTM, 实线为方法 2 提取的初始 DTM, 点划线和双点划线为方法 1、2 的最终 DTM。从图 7 中可以看出, 这两种方法所提取的最终 DTM 非常接近, 断面图几乎重合; 方法 1 提取的初始 DTM 几近一个平面, 而方法 2 所提取的初始 DTM 在形态上非常接近最终 DTM。在相同的实验环境下, 这两种方法生成初始 DTM 的时间比较接近, 而在由初始 DTM 生成最终 DTM 时, 方法 1 A、B 两区分别迭代了 22 次和 38 次, 而方法 2 分别迭代了 13 次和 24 次, 由此可见, 本文所提出的方法比 Masaharu & Ohtsubo (2000) 中的方法计算量小, 效率明显提高。

(2) 滤波结果评估

由于没有标准 DTM 或地物图与之对比, 仅利用单张航片进行人工地物提取的准确度也无法保证, 故本文在对滤波结果进行评估时, 采用以下 2 种分析法。一种是断面法, 比较 DSM 和最终 DTM 的横纵向断面图; 一种是平面法, 利用提取的 DTM 结果将 LIDAR 数据分为地物区和地面区, 并提取出地物轮廓线, 将该轮廓线与航空影像数据叠加, 估

算地物提取的准确率。

图 8 为 DSM 和最终 DTM 的横纵向断面比较图, 虚线表示 DSM, 实线为提取的 DTM。断面位置与前面相同。通过比较可以看出, 在没有地物的时候, DTM 与 DSM 重合, 当有地物的时候, DTM 从地物底下穿过, 地物被去掉, 有效地达到了滤波的目的。

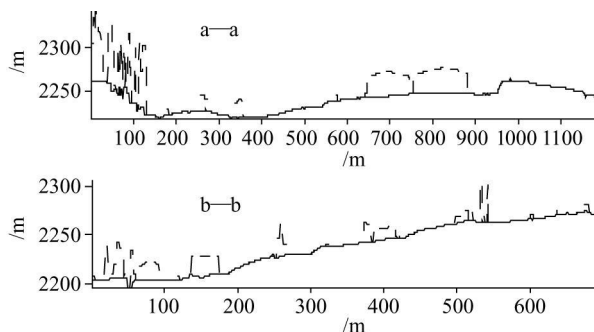


图 8 DSM 与 DTM 的比较

Fig 8 Comparison between DSM and DTM

图 9 为提取的地物轮廓线与航片的叠加图, 黑色线条表示地物轮廓线。从图中可以看出, 大部分的地物被提取出来, 准确率可达 80% (估计值) 以上。



图 9 提取的地物轮廓线与航片叠加图

Fig 9 Aerial photograph with outlines of objects extracted

4 结 论

本文介绍了一种基于等高线的表面估计滤波方法, 利用该方法对一地形起伏区域进行 DTM 提取实验, 然后利用与现有表面估计滤波方法的对比试验和所提取的地物轮廓线与航片的叠加试验对 DTM 提取试验结果进行了分析。分析结果表明, 本文所提出的方法较为简单, 但完全可以适用于地势起伏的地形表面, 提取的 DTM 较为准确; 在 DTM 提取过程中, 既不需要进行区域分割, 或是预先确定道路的位置, 也不需要根据地形的变化而改变任何参数, 较现有的表面估计滤波方法和形态学滤波方法更为简单, 更为

切实可行;与现有表面估计方法相比,本文所提方法提取的初始 DIM与最终 DIM在形态上更为接近,迭代次数少,计算量较小,效率高。

REFERENCES

- Akel N A, Zilbestein O, Doytsher M Y. 2003 Automatic DIM extraction from dense raw LIDAR data in urban areas. Proceeding of FG working week, Paris, France
- Kilian J, Haala N, Englich M. 1996 Capture and evaluation of aibome laser scanner data. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vienna, **31**(B3): 383–388
- Klaus K, Pfeifer N. 2001 Advanced DTM generation from LIDAR data. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Annapolis, Maryland, **34**: 23–35
- Li Y C, Wen W Q, Wang W. 2002 A LIDAR technological system for acquiring quickly 3D terrain data. Science of Surveying and Mapping, **27**(4): 35–38
- Liang X L, Zhang J X, Li H T. 2007 An adaptive morphological filter for LIDAR data filtering in urban area. Journal of Remote Sensing, **11**(2): 276–281
- Lohmann P, Koch A, Schaefer M. 2000 Approaches to the filtering of Laser scanner data. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Amsterdam, **33**: 540–547
- Masaharu H, Ohtsubo K. 2002 A filtering method of aibome laser scanner data for complex terrain. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Herald, **34**(3B): 165–169
- Sithole G. 2001 Filtering of laser altimetry data using a slope adaptive filter. International Archives of Photogrammetry Remote Sensing, Annapolis, Maryland, **34**(3/W3): 203–210
- Zhang X H. 2002 A ibome Laser Scanning Altimetry Data Filtering. Wuhan University

附中文参考文献

- 李英成, 文沃根, 王伟. 2002 快速获取地面三维数据的 LIDAR技术系统. 测绘科学, **27**(4): 35–38
- 梁欣廉, 张继贤, 李海涛. 2007. 一种应用于城市区域的自适应形态学滤波方法. 遥感学报, **11**(2): 276–281
- 张小红. 2002 机载激光扫描测高数据滤波及地物提取. 武汉大学

Filtering method of LIDAR data based on contours

REN Zi-zhen¹, CEN Min-yi¹, ZHANG Tong-gang², ZHOU Guo-qing²

¹ Southwest Jiaotong University, Sichuan Chengdu 610031, China

² Department of Engineering and Technology, Old Dominion University, Norfolk Virginia 23529, USA

Abstract Filtering is an important method to extract digital terrain model (DTM) from Light Detection and Ranging (LIDAR) data and has made some good effects in application, but existing filtering methods are deficiency in certain applications, especially unsuitable for undulated terrain. In this paper, a new filtering method which is based on contours is developed. The method mainly consists of three steps. Firstly, digital surface model (DSM) is generated from raw LIDAR data by surface interpolation methods, such as the nearest neighbor interpolation method, and then contours of DSM are generated. Secondly, these DSM contours are separated into three groups: ground contour, which only consists of points on ground; object contour, which only consists of points off-ground, such as on trees or roofs; and mixing contour, which consists of points on ground or off-ground. According to some properties of contours, including closeness, start/end distance, length of curve, denseness, ground contours and ground contour section of mixing contours are extracted and then some ground points are obtained. Finally, an initial approximation of the DTM is determined by interpolating those ground points. Then a refined DTM is obtained by an iterative method, comparing the approximate DTM with the original DSM and if the difference is below a predefined threshold, the original DSM points are selected and made into DTM data points. Otherwise, the location is marked as no data, and then the no data points are interpolated using the selected DSM data. Comparisons between initial and refined DTM obtained by methods proposed previously is done. To calculate the accurate probability, the objects obtained by new filter is compared with standard objects obtained from aerial images manually. All the experimental results show that the proposed method is a simple and practical one needing little calculation, and can be used in undulating terrain area.

Key words: LIDAR, filtering, contours, DSM, DTM