

文章编号: 1007-4619(2007)02-0276-06

# 一种应用于城市区域的自适应形态学滤波方法

梁欣廉, 张继贤, 李海涛  
(中国测绘科学研究院, 北京 100039)

**摘 要:** 数学形态学滤波是从激光雷达数据中识别地面点、创建数字高程模型的一种重要方法, 在应用中取得了较好的效果, 但也具有一些明显不足。在分析现有方法优劣及城市地形特点的基础上, 提出一种应用于城市环境的自适应形态学滤波算法。该方法采用分层识别策略: 首先通过分割得到地面主体部分; 之后利用正规化高度值寻找其余地面区域; 最后估计地物覆盖区域地面点取值。采用三个不同分辨率、不同地形、地物特点的数据集进行了实验, 结果表明该方法能有效识别地面和地物点, 并解决了窗口尺寸限制、粗差误判等问题。

**关键词:** 激光雷达; 滤波; 形态学滤波; 数字高程模型

**中图分类号:** TP751.1 **文献标识码:** A

## An Adaptive Morphological Filter for LIDAR Data Filtering in Urban Area

LIANG Xin-lian, ZHANG Ji-xian, LI Hai-tao  
(Chinese Academy of Surveying and Mapping, Beijing 100039, China)

**Abstract** In this paper, an adaptive morphological filter was developed to detect nonground LIDAR points in urban area based on the continuous region detection and a hierarchical recognition mechanism. First, all continuous regions are labeled, and major ground points are detected by the characteristics of spread and continuity. Second, detached ground points are recognized by the quality of continuity and normalized height. Third, the height within objects occupied regions is calculated by linear interpolation and smoothness. Three datasets from three urban areas are selected in the test with different point densities and landscape complexities. Qualitative and quantitative analyses have indicated that this filter could remove most nonground points effectively in moderate complex urban environments with the advantages of automatic window size determination and outliers detection.

**Key words** LIDAR /laser scanning; filtering; adaptive morphological filtering; DEM

### 1 引 言

立体量测一直是获取大面积数字高程模型 (DEM) 的有效手段。但在地形变化剧烈、纹理缺乏区域, 如城区、海岸带等, 这种方式效率较低并可能

遇到某些困难。相比之下, 直接获取对象表面三维信息的激光雷达技术在相关应用中更具优势。

激光雷达数据是分布于物体表面的点云, 具有离散、不均匀分布、数据类型多等特点<sup>[1]</sup>。这种离散点数据可能来自于能够反射激光信号的任意表面——地面、建筑物、植被和汽车, 甚至在天空飞行的鸟类

收稿日期: 2005-12-05; 修订日期: 2006-07-28

**基金项目:** 国家重点基础研究发展计划 (973) (编号: 2006CB701303), 地理空间信息工程国家测绘局重点实验室开放研究课题 (编号: 200601)。(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

**作者简介:** 梁欣廉 (1980—), 男, 2002 年获武汉大学工学学士学位, 2005 年获中国测绘科学研究院工学硕士学位。主要从事激光雷达数据处理与应用方面的研究。E-mail: kinlian@hofmail.com。

等;此外,数据集中常包含一些取值很低的无意义数据点(粗差)。因此,在进一步分析前,首先需要确定点的属性:地面或地物。在数据处理中,这种对原始激光脚点进行识别、分类的过程被称为滤波。

现有滤波方法大致可分为三类:表面估计、数学形态学和聚类分析。表面估计方法通过迭代过程更新当前地面模型,直至计算收敛得到地面点<sup>[2-5]</sup>。数学形态学方法通过高差判断点的属性<sup>[6-10]</sup>。聚类分析通过几何、光学、统计或其他特征对激光脚点进行识别<sup>[11,12]</sup>。其中,聚类分析在设计思想上与其他两种方法存在明显区别:它不依赖几何假设描述地形/地物形态,但在建立特征与聚类结果关系上存在一定困难。相关问题已超出本文范围,以下不做进一步讨论。

从本质上讲,表面估计和数学形态学方法最终表现为对数据点相对位置(平面、高程)的考察。它们面临的共性问题可以归纳为以下三点:(1)如何确定邻域大小。由于地形/地物分布的随意性,固定尺寸很难满足检测要求;动态调整策略虽能取得不错的效果,但需要人工指定一个最大尺寸<sup>[10]</sup>。(2)如何选择高差阈值。动态、迭代确定阈值的方式在应用中有很好的表现<sup>[2,8]</sup>。但是,由于较大高差与地形/地物变化间不存在充分必要关系,仅仅依靠高度差很难保证判断的准确性。(3)如何处理粗差。在地面点较地物点低的假设下,很容易将粗差点判断为地面点<sup>[2,13,14]</sup>。

基于对上述问题和城市区域特点的认识,本文提出一种自适应形态学滤波算法。该方法突破仅考察局部点间相互关系的常规思路,在顾及局部特征的同时,将考察范围拓展至整个数据集。实验表明,该方法能有效解决常规形态学算法需要人工确定邻域尺寸、无意义点误判两个问题,具有一定的实用性。

## 2 自适应形态学滤波

### 2.1 地面定义及假设

无论采用何种思想,滤波首先需要回答一个基本问题:什么是地面。现有算法对地面有不同描述(假设),如地面点是邻域内最低点<sup>[15]</sup>;地面点梯度值在局部范围内有限<sup>[9]</sup>;地面是一系列连续表面<sup>[16]</sup>,并且占据较大面积<sup>[17]</sup>;地面连续且低于地物<sup>[13]</sup>等。

这些描述具有一定普适性,但并没有充分顾及城市特征。城市是人类活动最集中的区域之一,有其自身特点。城区地面表现出三个明显特征:连续、互通和拓展。连续指相邻地面点间仅存在有限高差——由人及交通工具的行为特征和活动能力决定;互通指高差较大的相邻点在整个范围内存在通路——由地面功用(人类活动空间、可到达)决定;拓展指地面分布广泛,在空间上占有较大范围。

根据上述特点,本文提出一个对地面的描述(假设):城市环境下,地面由一系列连续区域组成,包括面积最大的连续区域。根据这个描述,地面可以被概括为连续和非连续两类。前者满足连续、互通、拓展特征。后者只满足连续特征——形成原因可以归结为地物(建筑物、树木等)或数据边界的分割。

### 2.2 自适应形态学滤波

基于 2.1 节对地面的描述,自适应形态学滤波通过三个递进过程识别地面点并建立 DEM。

第一,确定连续地面。构建并叠加两组相互垂直的剖面<sup>[18]</sup>,得到所有连续区域;根据拓展特征,确定面积最大的区域作为连续地面。在 DEM 中,这部分数据点保留原始取值。

第二,确定非连续地面。计算数据点正规化高度值——点  $i$  与临近地面点  $j$  的高差。基于连续特征,当点  $i$  所属区域内若干元素高度与相邻地面点相近时,判断该区域为非连续地面。在 DEM 中,属于非连续地面的点也保留原始取值。

第三,估计地物点的地面高程值。首先,在每条剖面上寻找临近地面点,假设两点间地面呈线性变化,通过内插估计地面高度;其次,取两方向上高度估计均值作为初步结果;最后,对地物区域进行平滑,得到最终估计值。

线性内插、平滑是一种比较简单的地面高度估计方法。采用这种方法是基于以下认识:城市是人类活动最集中的区域之一,地物所在区域的地形已发生剧烈变化(建筑物地基、地下室等),准确描述地物区域地面既不可能也不必——地面高度估计值的作用仅仅是形成一个对场景的平滑描述。因此,在可行的情况下,不妨优先使用比较简单的内插方法。

综上所述,DEM 中点的取值可由公式(1)表达:

(C)1999DEM21

$$\begin{cases} H_{p_i} | p_i \in n_i \\ H_{p_j} | p_j \in n_j, \text{且 } |H(p_i) - H(p_j)| \leq \Delta h_{\max} \text{ and } \text{Num}(p_j) \geq \text{Num}(p_i) \\ I_{p_k} | p_k \in n_k \end{cases} \quad \begin{aligned} n_i &= \max S(n_a) \\ p_i &\cup p_j \cup p_k = A \end{aligned}$$

http://www.cnki.net

2

式中,  $n_i$ ,  $n_j$ ,  $n_k$  分别为连续、非连续地面及地物区域;  $p_i$ ,  $p_j$ ,  $p_k$  分别为对应区域的激光脚点;  $H_{p_i}$ ,  $H_{p_j}$  为 DEM 中地面区域的取值 (保留原始数据值);  $I_{p_k}$  为 DEM 中地物区域的取值 ( $I$  为内插操作);  $\max$  为取最大值操作;  $n_a$  为任一连续区域;  $S$  为区域面积统计操作;  $\text{NormH}$  为计算点正规化高度值操作;  $\text{Num}$  为个数统计操作;  $n_T$  为满足正规化高度条件的点数量最小值;  $\Delta h_{\max}$  为选定的正规化高度阈值, 对应临近地面点间高差最大值, 实验中取  $0.2\text{m}$ ;  $m$  为区域数量;  $a$  为区域序号;  $A$  表示数据集。

通过分层识别策略, 自适应形态学滤波方法解决了由邻域尺寸和无意义点引起的若干问题: 首先,

搜索半径无需人工干预, 算法在处理不同尺寸地物时自行确定; 其次, 无意义点作为一个独立区域与其他部分同时处理, 算法根据高度特征 (而非邻域内最低点的属性特征) 进行判断, 不对后续处理造成影响。

### 3 结果与讨论

#### 3.1 实验数据

实验采用三个不同分辨率、具有不同地形、地物特点的数据集。图 1 给出了三个数据集的激光雷达数据, 表 1 列出了相关信息。

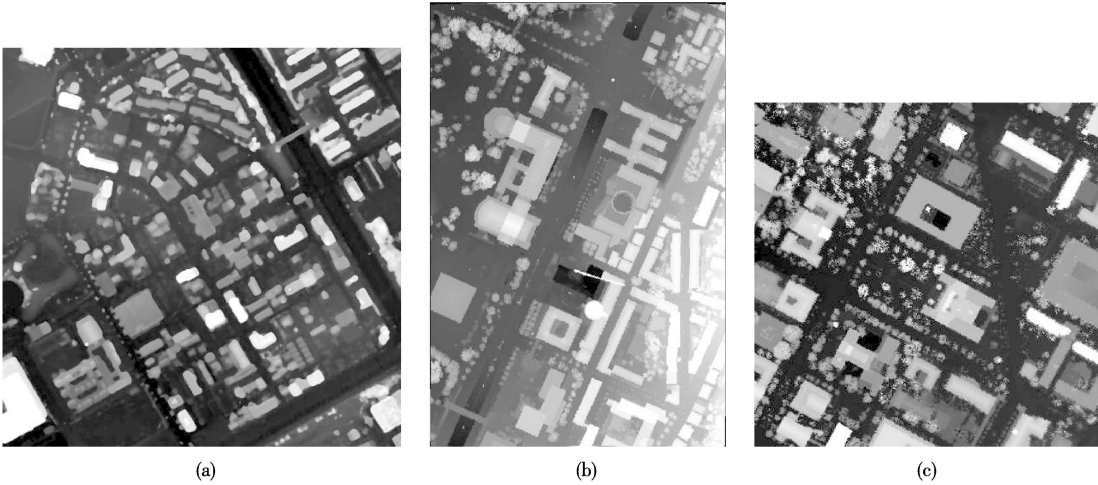


图 1 实验数据  
Fig 1 Data sets

表 1 实验数据集相关信息  
Table 1 Statistical information and characteristics concerning three data sets

数据	数据集 1(图 1(a))	数据集 2(图 1(b))	数据集 3(图 1(c))
维度 /(行 $\times$ 列)	600 $\times$ 600	634 $\times$ 422	400 $\times$ 400
像元尺寸 /(m $\times$ m)	1 $\times$ 1	1 $\times$ 1	0.5 $\times$ 0.5
密度 /(个数 /m <sup>2</sup> )	<1	0.67	$\geq 4$
高度变化 /m	22—55	283—351	9—64
地形、地物特点	分散、大 / 中 / 小型、不规则建筑物; 多种地物: 桥梁、树木	密集、大型、不规则建筑物; 多种地物: 桥梁、隧道、汽车; 与建筑物相邻的树木	大 / 中型、各类屋顶建筑物, 建筑物旁密集分布的树木

3.2 实验结果

3.2.1 实验结果

达数据进行滤波的结果。其中, 图 2(a)为数据集 1 地面区域的 shade relief 图; 图 2(b)和 (c)为数据集 2 和数据集 3 的滤波结果: 黄、黑点分别代表地物、地面点。

图 3 为三个数据集中复杂场景的滤波结果。

图 2 给出了应用自适应形态学滤波算法对激光雷



图 2 滤波结果中的地面和地物点  
Fig.2 Filtered data: object points are marked by black(a), yellow(b), (c)

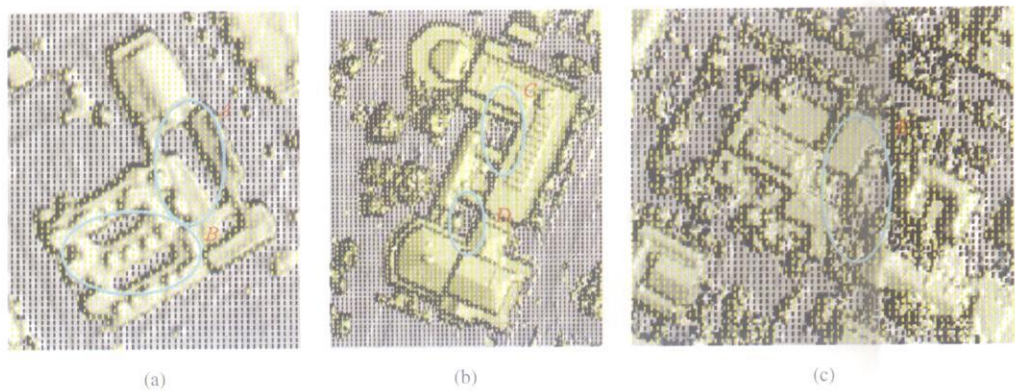


图 3 复杂场景的滤波结果  
Fig.3 Example of filtering result in complex environments: groun points, in black; object points, in yellow

3.2.2 定性分析

实验结果表明:自适应形态学滤波方法能够有效识别地面和地物点。在图 2 中,地面细节信息(A 区域)得到保留;树木被有效识别(B, G, J, K 区域)。在图 3 中,处于大型建筑物包围下的地面(A, B, C, D 区域)及建筑物和树木包围下的地面(E 区域)都得到正确识别。

同时,实验结果也表明:地形、地物分布因素对滤波结果有比较明显的影响。这些因素包括:(1)数据边界。图 2(a)的 D 区域是由 E 处坡地和数据边界分割形成的非连续地面。由于不满足互通特征,且高度值与临近地面差别较大,该区域基本上被识别为地物。(2)地形、地物分布形式。图 2(a)中的 F 区域与图 2(b)中 H 区域都是由地物和数据边界分割形成的非连续地面区域。但由于附近地形、地物的平面、高度特征不同,前者被正确识别为地

面,后者被判断为地物。

图 4 显示了生成 DEM 的 shade relief 图。其中,明显人工地物被去除;地面部分比较平滑。在图 4(b)中也存在一些变化不连续的区域,这主要是由地物分布形式及内插方法引起的。一方面,数据集 2 中建筑物分布密集,覆盖面积大,附近地面点不能很好反映地物区域内部的状况;另一方面,简单的线性内插方法也对这种状况有一定影响。

3.2.3 定量分析

定量分析采用人工判读方法:从滤波结果中任意选取 100 个参考点(地面、地物各 50 个),通过判读获取对应类别,并与滤波结果进行比较。表 2 显示了三个数据集的精度评价结果。其中,错误 I 指将地面点标记为地物点造成的错误,错误 II 指将地物点标记为地面点造成的错误。

从表 2 的结果可知:(1)两个类别中被正确识

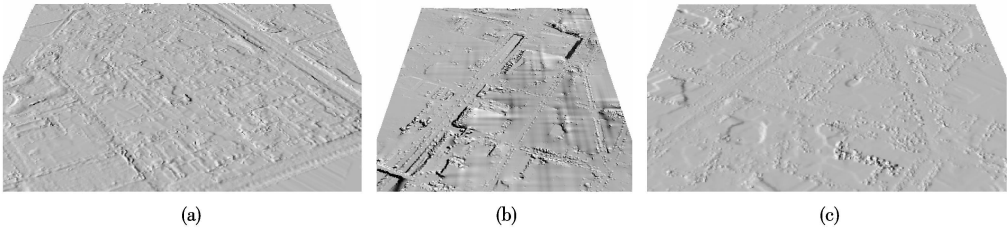


图 4 DEM 示意图

Fig 4 Filtered data in perspective views

表 2 滤波结果评价

Table 2 Percentage of type I and II errors				
数据集	参考点	滤波结果		统计
		地面点	地物点	
No 1	地面点	47	7	错误 I (%) 14.0
	地物点	3	43	错误 II (%) 6.0
No 2	地面点	49	7	错误 I (%) 14.0
	地物点	1	43	错误 II (%) 2.0
No 3	地面点	47	8	错误 I (%) 16.0
	地物点	3	42	错误 II (%) 6.0

别的部分都在 80% 以上,滤波结果基本反映了地貌的实际情况;(2)错误 I 大于错误 II。这主要源于算法设计中降低第二类错误的初衷——也是多数滤波算法设计的倾向。

3.2.4 讨论

1. 连接地物属性

Sithole and Vossem an<sup>[19]</sup>将地物分为分离、连接两类:前者指四周与地面存在明显高差的物体(如建筑物等),后者指部分边与地面存在明显高差的物体(如桥梁、斜坡等)。

建议把与地面衔接平缓的地物(如两端与地面

平缓相连的桥)的属性认定为地面。首先,考虑到这些地物的功能和形态,可以将它们认为是道路(属于地面)的一种特殊形式。其次,在几乎不存在自然地貌的城市区域内,许多人工构筑物可以归属于地面。

如果认为这种连接地物不属于地面,可以把相应的滤波结果作为第二类错误,不会对滤波算法产生实质性影响。

2. 滤波器设计

复杂、多样的地面/地物形态给滤波器设计带来许多挑战。本文提出一种新的全局检测思路,取得了较好的效果。但也应注意到,在一些变化复杂、形态特殊的环境下,整体检测的方法并不能保证有效识别地面点。

以图 2(b)中的 I 区域为例,图 5(a)显示了该场景的放大图,其中直线表示剖面位置,图 5(b)显示了剖面上的高度值。

该场景为处于建筑物包围下的广场:通过东侧(向下)的通路、西侧(向上)的阶梯可以到达公路。由于与外界连接通道陡峭,与四周地面有明显高差,当仅考察广场与周围地面高度关系时,很难在两者间建立关联关系。类似情况下,局部高度变化似乎才是做出合理判断的基础。但是,由于局部高差与地形/地物变化间不是充分必要关系(图 5(c)),仅

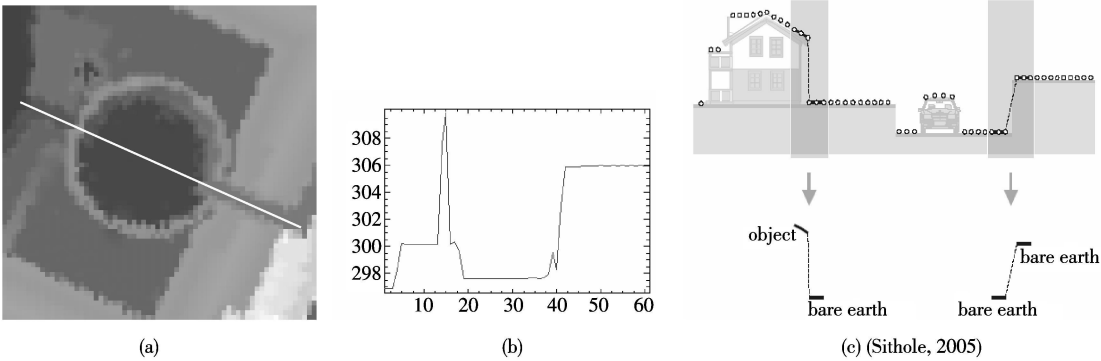


图 5 复杂建筑物场景

Fig 5 Examples of complex man-made scenes

考察局部变化有可能引进更多误判。因此，有必要综合两种设计思想。

4 结 论

本文提出一种应用于城区的自适应形态学滤波算法。该方法以城市区域地面特点和地形、地物基本分布关系为出发点，以连续区域相互关系为判断依据，以分层识别为手段，解决了常规形态学滤波方法的两个主要问题：搜索窗口尺寸需要人为指定和对粗差点易产生误判。实验结果表明，该方法能在城市环境下有效识别地面和地物点。进一步工作可以在两个方面展开：局部、整体综合检测；适应于建筑物密集区域的简单内插方法。

**致 谢** 感谢尤素亚博士、闫平硕士提供的实验数据。

参 考 文 献 (References)

[ 1 ] Liang X L, Zhang J X, Li H T, et al. The Characteristics of LIDAR Data [ J ]. Remote Sensing Information, 2005, ( 3 ): 71—76 [梁欣廉,张继贤,李海涛等. 激光雷达数据特点 [ J ]. 遥感信息, 2005, ( 3 ): 71—76 ]

[ 2 ] Axelsson P. Processing of Laser Scanner Data: Algorithms and Applications [ J ]. ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, 1999, 54(2/3): 138—147.

[ 3 ] Bretar F, Chesnier M, Roux M, et al. Terrain Modeling and Airborne Laser Data Classification Using Multiple Pass [ A ]. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science [ C ], 2004, 35(B3): 314—319.

[ 4 ] Pfeifer N, Stadler P, Briese C. Derivation of Digital Terrain Model in the SCOP++ Environmen [ A ]. OEEPE Workshop on Airborne Laserscanning and Interferometric SAR for Digital Elevation Models [ C ]. Stockholm, 2001.

[ 5 ] Zhang X L. Airborne Laser Scanning Altimetry Data Filtering and Features Extraction [ D ]. Wuhan University, 2002 [张小红. 机载激光扫描测高数据滤波及地物提取 [ D ]. 武汉大学, 2002 ]

[ 6 ] Kilian J, Haala N, Englich M. Capture and Evaluation of Airborne Laser Scanner Data [ A ]. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing [ C ], 1996, 31 ( B3 ): 383—388.

[ 7 ] 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.

[ 8 ] Sithole G. Filtering of Laser Altimetry Data Using A Slope Adaptive Filter [ J ]. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing, 2001, 34(3/W4): 203—210.

[ 9 ] Vosselman G. Slope Based Filtering of Laser Altimetry Data [ J ]. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing, 2000, 33(3/W4): 203—210.

[ 10 ] Zhang K, Chen S C, Whitman D, et al. A Progressive Morphological Filter for Removing Nonground Measurement from LIDAR Data [ J ]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2003, 41(4): 872—882.

[ 11 ] Guo T. 3D City Modeling Using High-resolution Satellite Image and Airborne Laser Scanning Data [ D ]. The University of Tokyo, 2003.

[ 12 ] Maas H G. The Potential of Height Texture Measures for the Segmentation of Airborne Laserscanner Data [ A ]. Proceedings of The 4th International Airborne Remote Sensing Conference and Exhibition [ C ]. Ottawa, Canada, 1999.

[ 13 ] Shan J, Sampath A. Urban DEM Generation from Raw Lidar Data: A Labeling Algorithm and its Performance [ J ]. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 2005, 71(2): 217—226.

[ 14 ] Masaharu H, Ohtsubo K. A Filtering Method of Airborne Laser Scanner Data for Complex Terrain [ A ]. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science [ C ], 2002, 34(3B): 165—169.

[ 15 ] Lindenberger J. Laser-Profilmessungen zur Topographischen Geländeaufnahme [ D ]. Ph. D. Dissertation, Institute for Photogrammetry, Stuttgart University, Deutsche Geodatische Kommission, Reihe C, No. 400, Munich, 1993.

[ 16 ] Elmqvist M. Ground Surface Estimation from Airborne Laser Scanner Data Using Active Shape Models [ A ]. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science [ C ], 2002, 34(3A): 114—118.

[ 17 ] Akei N A, Zilberstein O, Doytsher Y. Automatic DTM Extraction from Dense Raw Lidar Data [ A ]. Proceedings of FIG working week 2003 [ C ]. Paris, France, 2003.

[ 18 ] Sithole G, Vosselman G. Automatic Structure Detection in a Point Cloud of Urban Landscape [ A ]. 2nd Joint Workshop on Remote Sensing and Data Fusion Over Areas (Urban, 2003), Berlin, Germany, 2003.

[ 19 ] Sithole G. Segmentation and Classification of Airborne Laser Scanner Data [ D ]. Delft University of Technology, 2005.