

基于平面延展方法的 LiDAR 数据滤波

吴洪波, 蓝天, 彭涛, 倪国强

(北京理工大学 光电成像技术与系统教育部重点实验室, 北京 100081)

摘要: 在对目前机载 LiDAR 数据后处理典型算法分析比较的基础上, 针对机载 LiDAR 技术实际应用中数据处理稳定性、智能性与适应性的更高需求, 提出了一种快速稳健滤波方法, 即平面延展方法。它利用单元平面的生长形成整个地表, 相对常规方法增加了栅格化数据、填充空白数据及剔除错误冗余数据等操作, 利用可靠的判定条件选择了基础点。采用平面延展方法对不同地形区域的 LiDAR 数据进行了滤波, 将滤波前后的数据图像进行对比, 采用三种客观误差指标评价处理质量。结果表明, 平面延展方法稳健、可靠、效率高, 能够在保证精度的情况下有效分离出非地面信息, 在应用中有一定的优越性。

关键词: LiDAR; 平面延展法; DEM; 预处理

中图分类号: P208 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2013)06-1467-07

Filtering of LiDAR data based on extending plane method

Wu Hongbo, Lan Tian, Peng Tao, Ni Guoqiang

(Key Laboratory of Photoelectronic Imaging Technology and System, Ministry of Education of China, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: On the basis of comparison and analysis of several typical airborne LiDAR data processing algorithms, a fast and robust method named extending plane method was presented to meet the increasing demand of processing algorithms' stability, intellectuality and adaptability in the application of airborne LiDAR technology. The whole surface was built by plane units' extending. Compared with traditional algorithms, this method added some operation which included rasterizing data, filling the blank data cells and removing incorrect and redundant data. Reliable restrictions were utilized when choosing basic points. LiDAR data from different areas were filtered by this method and the resulting figures were compared with the original figures. The quality of processing was evaluated with three kinds of error indexes. The results indicate that extending plane method is robust, reliable and efficient. It separates non-ground points from point clouds effectively with a high-precision and shows advantage applications to.

Key words: LiDAR; extending plane method; DEM; preprocessing

收稿日期: 2012-10-11; 修订日期: 2012-11-13

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(2009CB72400401A)

作者简介: 吴洪波(1987-), 男, 硕士生, 主要从事机载激光雷达高精度成像方面的研究。Email: wuhongbo.cool@163.com

导师简介: 蓝天(1962-), 女, 教授, 硕士生导师, 博士, 主要从事激光雷达数据误差溯源及补偿方面的研究。Email: lantian@bit.edu.cn

0 引言

机载 LiDAR 能够实现地面点的快速定位和地表信息的快速提取^[1],从 LiDAR 数据可以直接生成数字表面模型 (digital surface model, DSM),采用一定的滤波算法剔除地物点提取地面信息,内插生成数字高程模型(digital elevation model, DEM)。高精度的 DEM 是地面数字化的实际应用基础,在诸多领域都起着极其重要的作用^[2-4],而如何生成高精度的 DEM 一直是国内外研究的热点之一。

迄今为止,机载 LiDAR 系统硬件技术的发展比较成熟,绝大部分属于硬件及系统集成的问题已得到解决,但 LiDAR 数据的后处理技术却相对滞后^[5],这一点在很大程度上制约了 LiDAR 在更多领域应用的拓展。

现在流行的几种机载 LiDAR 数据后处理算法大都是由国外的专家学者提出的。1993年,德国斯图加特大学的 Lindenberger 采用数学形态学方法对机载 LiDAR 数据进行滤波处理^[6],但该方法依赖初始窗口尺寸的分析;1999年, Axelsson 提出了一种渐进式不规则三角网加密算法^[7],但此算法计算量和算法复杂程度相对较大;Petzold 等人同年提出了移动窗口法^[8],但此算法的滤波适用性相对较差;同样也是在 1999年,奥地利维也纳大学的 Kraus 等提出了迭代线性最小二乘内插滤波算法^[9],但此算法在滤波过程中参数设置复杂,计算时间长;2000年, Vosselman 提出了基于坡度的滤波算法^[10],但此方法的结果几乎完全依赖初始坡度的主观设定。我国的 LiDAR 技术起步较晚,与国外先进水平有很大的差距,国内的一些专家学者也展开了很多的研究。在数据滤波方面,武汉大学张小红提出了一种“移动曲面拟合”的滤波算法^[11],该算法自适应性强,但需大量人工干预;2007年,赖旭东等提出了一种生成农村地区 DEM 的新方法^[12],但缺乏一定的实用性;2009年,中国地质大学(武汉)的吕献林提出了一种多源数据辅助机载 LiDAR 数据生成 DEM 的方法^[13],但没有实现算法的智能化;2012年成晓倩等人提出一种基于图像分割技术的城区机载 LiDAR 数据滤波方法,但该方法需要一些先验知识,适应性较差^[14]。综上所述,目前 LiDAR 数据滤波的主要困难在于算

法适用性较差、自动化水平不高、处理效率低等。

文中通过对同一地形采用不同方法处理所得结果的对比验证了平面延展方法的可行性和稳健性,通过对不同地形采用平面延展方法所得结果的分析检验了该方法对复杂地形的适应性。

1 平面延展算法描述

1.1 基本原理

由于地表一般都是连续的,相邻激光脚点高程之间存在一定的关联,根据这种关系采用曲面拟合的方法可以进行地表重建^[15]。平面延展法就是依据这一原理操作的,改进后的方法假设地形表面是一个复杂的空间曲面,将空间曲面分割成多个局部小面元,当局部面元小到一定程度时,就可以将该局部面元近似表达成一个平面,如公式(1)所示:

$$z_i=f(x_i, y_i)=a_0+a_1x_i+a_2y_i \quad (1)$$

对于栅格化的数据,每个网格是数据处理的最小单元,因此在进行处理时可以将每个网格看作一个小平面,而整个地表就相当于由多个小平面拼接而成。这种数据处理算法的主要目的就是找到这些合适的平面。

1.2 算法基本步骤

首先,将离散点数据系列进行二维排序,对排序后的数据进行栅格化处理,剔除错误的点并填充空白的栅格;其次,以三个靠前的地面激光脚点作为基础点,三点可确定一个平面,即初始拟合面;然后将邻近的备选脚点的平面坐标代入平面方程,可计算出备选脚点的拟合高程值,若拟合高程值同该脚点的观察高程值之差超过给定的阈值,则认为该激光脚点不是地面点而用拟合的高程值替换该点的高程;否则,则接受该脚点作为地面脚点,同时保持高程值不变;第三步,利用新接纳的激光脚点和与其靠近的两个激光脚点重新拟合成一个地形表面。不断重复上述步骤,就相当于有一个平面网在整个测区内不断延展,最终遍布整个测区完成 LiDAR 数据滤波过程。

图 1 是平面延展法滤波示意图,其中白色点 1 为一级初始基础点,点 2、3 为次级基础点,白色点 4b、5b、6b 等为原始激光脚点,不同的线型组成的面为不同的拟合平面,灰色点 4a、5a、6a 等为相应面拟

合出的脚点。其中 4 点的拟合点 4a 与原始脚点 4b 的高程差值在阈值内或拟合面坡度满足测区坡度要求,故保留原始脚点 4b 为地表点,再由点 2 作为一级基础点,点 3、4b 作为次级基础点去拟合 5 点的高程,5a 点为其拟合点,它与 5b 点的高程差大于阈值且拟合面坡度不能满足测区坡度要求,所以剔除原始脚点 5b 并保留拟合点 5a 作为地表点,继续拟合后续点的高程。如此进行下去,就可以得到整个区域的地表点高程值。

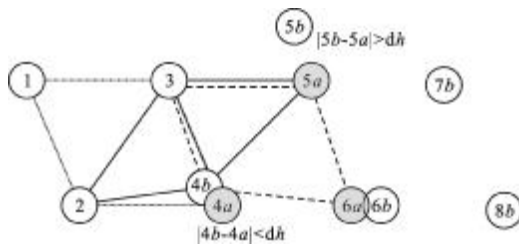


图 1 平面延展法滤波示意图
Fig.1 Scheme of extending plane filtering

2 算法实现过程

在进行 LiDAR 数据处理时,首先对测区数据进行分析,然后根据平面延展方法的特点进行数据预处理,这样才能更准确地对数据进行滤波,进而得到较理想的滤波结果。

2.1 测区数据分析

为验证平面延展方法的优越性和对不同地形的适用性,文中所选的两个测试区分别为城区(测区 1)和城林混合区(测区 2),表 1 为测试样区 1 的基本情况,图 2(a)所示为该样区的 DSM 图。所选测试区共有 27 108 个激光点,对应 154 m×179 m 的实地范围,最大高程为 346 m,最小高程为 308.66 m,测试数据内含有建筑物信息、植被信息以及地面信息等。表 2 为测试样区(2)的基本情况,图 2(b)所示为该样区的 DSM 图。所选测试区共有 443 092 个激光点,对应 829 m×1 243 m 的实地范围,最大高程为 426.37 m,最小高程为 307.61 m,测试数据内含有密集的植被、建筑物信息及山坡、公路等复杂信息。

另外,通过对两个测区的分析和计算可知,当以 1 m 为水平距离时,测区 1 地面的坡度在[-0.18, 0.18]内,测区 2 的地面坡度在[-0.42, 0.42]内。

表 1 测试样区 1 情况

Tab.1 Condition of No.1 test region

Data/(°)	Point density /points·m ⁻²	Terrain characteristics
Minimum of X	512 107	Intensive buildings mixed with vegetation, open flat area covered by height mixed vegetation, data deficient
Minimum of Y	5 403 170	
Maximum of X	512 261	
Maximum of Y	5 403 349	

表 2 测试样区 2 情况

Tab.2 Condition of No.2 test region

Data/(°)	Point density /points·m ⁻²	Terrain characteristics
Minimum of X	512 396	Slope covered by intensive buildings and vegetation, open slope, winding roads, data deficient
Minimum of Y	5 403 627	
Maximum of X	513 225	
Maximum of Y	5 404 870	

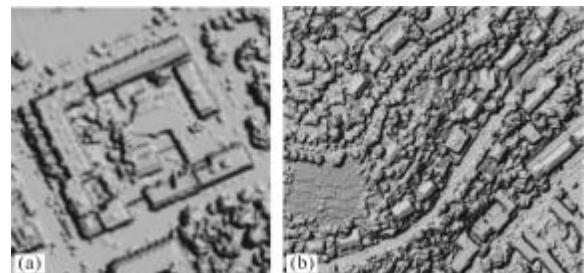


图 2 测试样区 DSM 图

Fig.2 Digital surface model

图 3(a)为测区 1 数据高程的统计分布情况,从统计情况分析来看,高程处于 311~318 m 及 332~336 m 范围内的数据点数量较多,由于该区为地势相对平坦的城区,因此可初步判断分布在 311~318 m 高程内的这些点应为地面点和地面上的低植被点,分布在 332~336 m 内以及更大高程数据所包含的信息应为建筑物信息,而位于 318~332 m 之间的数据点应为高植被点和一些较低建筑物点。图 3(b)为测区 2 数据高程的统计分布情况,由图可见,高程位于 308~353 m 及 368~413 m 范围内的数据点比较多,根据实际地势分析可以初步断定:308~353 m 内的数据点大多是地面信息,而 368~413 m 内的数据点则包含大量非地面信息和少量地面信息,高程更大的数据点一定为非地面信息。

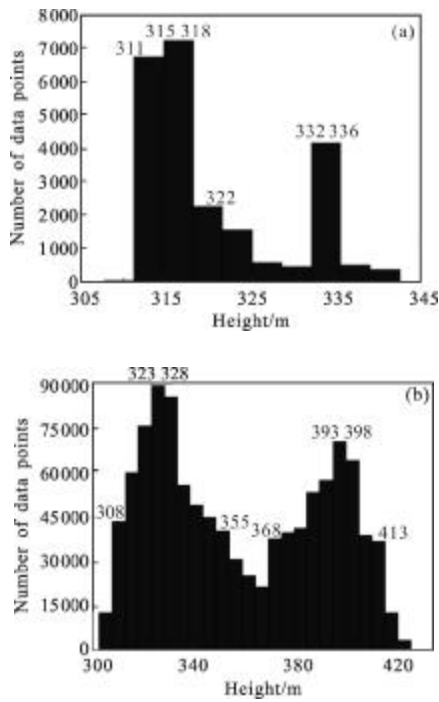


图 3 测区数据高程分布

Fig.3 Elevation distribution of the test region

2.2 数据预处理

数据预处理主要包括数据二维排序、数据栅格化以及数据空白填充等内容。采用平面延展方法处理数据的过程,相当于一个平面在整个区域不断延展的过程。为了增加可操作性,可以使该平面按一定方向进行延展,这就要求待处理的数据有序可依,因此,在数据预处理中首先要对待处理数据进行二维排序。平面延展法是基于栅格数据操作的,因此要对数据进行栅格化处理。记录每个栅格中的高程值,如果一个栅格单元中含有多个数据点,则只记录其中数据点的最小高程值,用它代表该栅格单元的高程。经过栅格化后的数据集内存在一些空白的栅格单元,其中大面积栅格单元的数据空白可能是由于一定区域内数据缺失或者水体吸收激光信号造成的,而个别栅格单元的空白则可能是由于数据比较稀疏造成的,在数据预处理时应应对这些空白栅格进行填充。对于大面积的空白栅格,采用边界上最低地面点进行赋值填充;对于个别的空白栅格则采用邻域平均值法进行填充。

2.3 数据处理

图 4 为数据滤波的流程图,其中 h_1 为一级基础点的高程值, h_2 、 h_3 为次级基础点的高程值, h_{4a} 为

由 h_1 、 h_2 、 h_3 拟合出的在待定脚点处的高程值, h_{4b} 为该脚点的原高程值, h_4 为滤波后该脚点的高程值, dh 为设定的高差阈值。

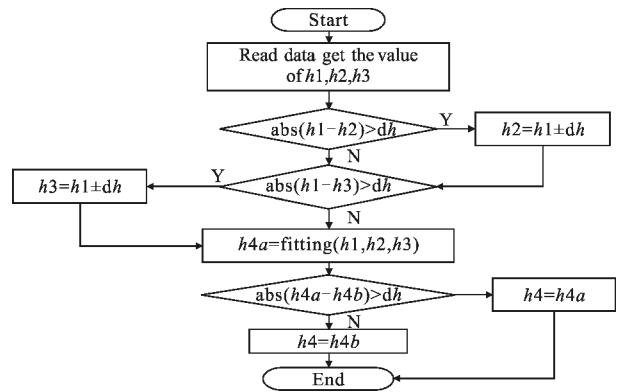


图 4 平面延展方法数据滤波流程图

Fig.4 Flow chart of extending plane filtering

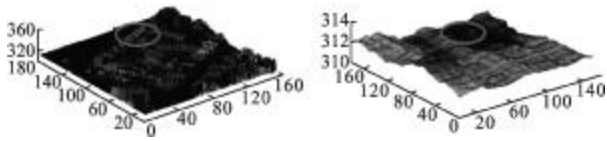
在数据处理过程中存在两个关键的问题:基础点的选择以及高差阈值的设定。基础点必须是可靠的地面点,否则不能达到剔除非地面信息的目的。由于所使用的数据中地面脚点数量占据绝对优势,因此这些占据数量优势的点可被视为地面点,而它们的高程值则可以作为一级基础点高程选取的依据;在拟合每个平面前都要进行次级基础点的选择,它的高程需要由一级基础点的高程值及高差阈值来决定,即接受与一级基础点的高差值在阈值之内的点作为次级基础点。高差阈值决定了某脚点是否为地面点,并关系到能否在保留原有地面信息的同时剔除非地面信息,因此在设定高差阈值时需要根据地形的特点及地貌信息的组成来分析。由于一般低矮植被的高度都在 10~30 cm,所以文中针对选取的两个实验区,阈值分别选在 10~30 cm。

3 处理结果与质量评价

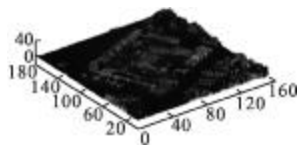
3.1 处理结果

图 5 为测区 1 滤波前后的对比图,其中,图(a)为滤波前的 DSM 图,图(b)为图(a)在高差阈值 dh 为 0.1 m 时的滤波结果,图(c)为图(a)到图(b)的高程变化图,即被剔除的信息。由图(a)与图(b)的对比可发现,图(a)含有高程突变的非地面信息(如建筑物、植被等),图(b)地表相对平缓没有较大的高程突变现象,说明图(a)中的非地面信息经过滤波被剔除,并

由地面信息代替。图(a)与图(c)十分相似,表明绝大部分非地面信息都被剔除。



(a) 滤波前图像 (b) 滤波后图像
(a) Before filtering (b) After filtering



(c) 高程差图像
(c) Figure of elevation difference

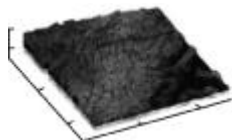
图 5 测区 1 滤波前后图像对比

Fig.5 Comparion of No.1 test region's figures

图 6 为测区 2 滤波前后的对比图,其中图(b)为图(a)图在高差阈值为 0.3 m 时的滤波结果。图 6 中的(a)、(b)、(c)三个图之间的关系与图 5 中三个图的关系相同(图(b)地表相对平缓没有较大的高程突变现象,图(a)与图(c)十分相似),说明平面延展算法不仅适用于平坦的地形,也适用于山林地形。



(a) 滤波前图像 (b) 滤波后图像
(a) Before filtering (b) After filtering



(c) 高程差图像
(c) Figure of elevation difference

图 6 测区 2 滤波前后图像对比

Fig.6 Comparion of No.2 test region's figures

图 7 为测区 1 和测区 2 局部的处理效果,它们分别位于图 5 和图 6 中的圆圈标记处。从图 7 可看出,无论是建筑物信息(测区 1),还是植被信息(测区 2),都能很好地被滤波,得到真实地面信息。

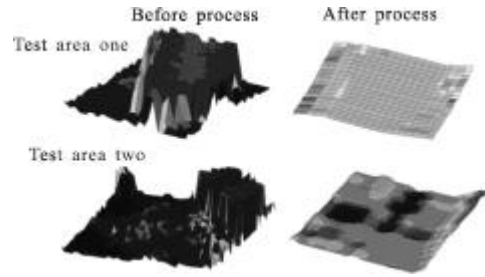


图 7 测区 1 和 2 滤波前后图像局部对比

Fig.7 Local comparison of No.1 and No.2 test region's figures

3.2 质量评价

对于滤波质量的评价,可以采用 George Sithole 等人提出的三个评价指标^[16],即假定:**a**表示实验数据中地面点的总数;**b**表示实验数据中非地面点的总数;**c**表示被误分类为非地面点的地面点的总数;**d**表示被误分类为地面点的非地面点的总数。定义三个评价指标:一类误差: c/a ;二类误差: d/b ;总误差: $(c+d)/(a+b)$ 。

由于大多数情况下实际地形都比较复杂,为了得到高精度的 DEM,通常要选择较小的二类误差而忽略一类误差。总误差是衡量两类误差总数的指标,在任何情况下,总误差越小滤波效果越准确。

参考文献[17]针对同样的实验样区(测区 1)分别采用数学形态学滤波方法和 TerraScan 软件对数据滤波,所得结果的第一类误差分别为 23.88%和 7.91%,第二类误差分别为 8.86%和 1.03%,总体误差分别为 17.62%和 4.78%,如表 3 和 4 所示。采用文中的平面延展方法对测区 1 滤波时,所得结果的三个误差指标见表 5。

表 3 数学形态学方法滤波结果

Tab.3 Results of mathematical morphology filtering

		Categorical data				
		Ground points	Non-ground points	All points	Errors	Unused data
Reference data	Test area one					
	Ground points	8 957	2 810	11 767	23.88%	
	Non-ground points	745	7 662	8 407	8.86%	8 868
	All points	9 720	10 472	20 174	17.62%	

表 4 TerraScan 软件滤波结果

Tab.4 Results of TerraScan

Test area one	Categorical data					
	Ground points	Non-ground points	All points	Errors	Unused data	
Reference data	Ground points	14 322	1 230	15 552	7.91%	
	Non-ground points	134	12 855	12 989	1.03%	321
	All points	14 456	14 085	28 541	4.78%	

表 5 平面延展方法滤波结果

Tab.5 Results of extending plane filtering

Test area one	Categorical data					
	Ground points	Non-ground points	All points	Errors	Unused data	
Reference data	Ground points	11 302	1 106	12 408	8.91%	
	Non-ground points	96	10 340	10 436	0.92%	4 264
	All points	11 389	11 436	22 844	5.26%	

从表 5 可看出,平面延展方法滤波结果的一类误差为 8.91%,二类误差为 0.92%,总误差为 5.26%。对比表 3 和表 5,平面延展算法滤波结果的三个误差指标均明显优于数学形态学方法的处理结果;对比表 4 和表 5,它的一类误差和总误差与 TerraScan 软件的处理结果相当,二类误差要好于 TerraScan 软件的处理结果。

另外,在数据处理过程中平面延展方法使用的数据点数为 22 844,占总数据点数的 84.3%;数学形态学方法使用的数据点数为 20 174,占总数据点数的 69.5%;TerraScan 软件使用的数据点数为 28 541,占总数据点数的 98.9%。可见笔者改进后的平面延展算法使用 84.2%的数据点就可获得与 TerraScan 软件使用 98.9%的数据点相当的滤波结果,在对处理结果影响不大的情况下,这种方法能够减少对冗余、错误数据的分析处理,提高了处理效率。

山林地区的数据处理相对平坦地区的数据处理要困难很多,采用平面延展算法对有包含一定陡坡

的山林区和城区的复杂数据做处理,所得结果的几类误差指标见表 6。处理时使用了近 87.3%的高程数据,得到的第一、二类误差分别为 11.64%、1.87%,总误差为 8.28%。对比表 5 可发现,平面延展方法对不同地势进行处理,所得结果的误差基本相当,这表明该方法的适应性很强,可以用于复杂地形的数据处理。

表 6 平面延展方法滤波结果

Tab.6 Results of extending plane filtering

Test area one	Categorical data					
	Ground points	Non-ground points	All points	Errors	Unused data	
Reference data	Ground points	224 321	29 551	253 872	11.64%	
	Non-ground points	2 486	130 461	132 947	1.87%	56 273
	All points	229 368	157 451	386 819	8.28%	

4 结 论

文中提出的平面延展方法,在数据处理之前首先对其进行预处理,主要包括栅格化数据、填充空白数据及剔除错误数据;另外,数据处理时在初级、次级基础点的选取上增加了判定条件,使得基础点更加可靠,数据滤波更加准确。通过实验验证,这种方法适用于多种复杂地表的信息处理,能够在有效地剔除非地面信息的同时,又能很好地保留地面原貌;它算法简单,处理中减少了算法对冗余数据的分析处理,提高了处理效率;能够自动剔除错误数据点,有利于减小滤波误差;处理时只需人为设定高差阈值,可以在保证精度的前提下减少人为控制,提高了自动化处理水平。平面延展方法在 LiDAR 数据滤波方面具有一定可复制性和实用性。其不足之处是对数据进行栅格化,很大程度地提高了处理效率,同时也存在丢失地面信息的可能;另外,这种方法对数据边缘信息保护还不够好,可能会影响后续的数据处理,因此这种方法还有待进一步改进。

参考文献:

- [1] Wu Jianwei, Ma Hongchao. Error analysis on laser beam misalignment with scanner mirror of airborne LiDAR [J].

- Infrared and Laser Engineering, 2008, 37(2): 243-246. (in Chinese)
- 邬建伟, 马洪超. 机载 LiDAR 激光束与扫描镜对准误差影响分析[J]. 红外与激光工程, 2008, 37(2): 243-246.
- [2] Tao Jinhua, Su Lin, Li Shukai. Method of extracting building model from lidar point cloud [J]. Infrared and Laser Engineering, 2009, 38(2): 340-345. (in Chinese)
- 陶金花, 苏林, 李树楷. 一种从激光雷达点云中提取建筑物模型的方法[J]. 红外与激光工程, 2009, 38(2): 340-345.
- [3] Ma Hongchao, Yao Chunjing, Zhang Shengde. Some technical issues of airborne LiDAR system applied to Wenchuan earthquake relief works [J]. Journal of Remote Sensing, 2008, 12(6): 925-932. (in Chinese)
- 马洪超, 姚春静, 张生德. 机载激光雷达在汶川地震应急响应中的若干关键问题探讨 [J]. 遥感学报, 2008, 12(6): 925-932.
- [4] Xu Jingzhong, Wan Youchuan, Lai Zulong. Multi-scale method for extracting road centerlines from LIDAR datasets [J]. Infrared and Laser Engineering, 2009, 38(6): 1101-1103. (in Chinese)
- 徐景中, 万幼川, 赖祖龙. 机载激光雷达数据中道路中线的多尺度提取方法 [J]. 红外与激光工程, 2009, 38(6): 1101-1103.
- [5] Axelsson P. DEM generation from laser scanner data using adaptive TIN models [J]. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, 2000, 33(B4): 110-117.
- [6] Lindenberger J. Laser-profilmessungen zur topographischen geländeaufnahme [D]. München: Universität Stuttgart Verlag der Bayerischen Akademie der Wissenschaften, 1993.
- [7] Axelsson P. Processing of laser scanner data-algorithms and application[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, 1999, 54:138-147.
- [8] Petzold B, Axelsson P. Result of the OEEPE WG on laser data acquisition[J]. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, 2000, 33(B3): 718-723.
- [9] Kraus K, Pfeifer N. Determination of terrain models in wooded areas with airborne laser scanner data [J]. ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, 1998, 53(4): 193-203.
- [10] Vesselman G. Building reconstruction using planar faces in very high density height data [J]. International Archives of Photogrammetry & Remote Sensing, 1999, 32(3/2): 87-92.
- [11] Zhang Xiaohong. Airborne laser scanning altimetry data filtering and surface features extraction [D]. Wuhan: Wuhan University, 2002. (in Chinese)
- 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.
- [12] Lai Xudong, Wan Youchuan. Algorithm to generate DEM in rural areas from LiDAR data [J]. Infrared and Laser Engineering, 2007, 36(S): 188-191. (in Chinese)
- 赖旭东, 万幼川. 一种从农村地区 LiDAR 数据中自动提取 DEM 的算法[J]. 红外与激光工程, 2007, 36(S): 188-191.
- [13] Lv Xianlin. Research on the method of generating DEM with LiDAR and multisource data [D]. Beijing: China University of Geosciences, 2009, 5. (in Chinese)
- 吕献林. 多源数据辅助机载 LiDAR 数据生成 DEM 方法研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2009, 5.
- [14] Cheng Xiaoqian, Fan Liangxin, Zhao Hongqiang. Filtering of airborne LiDAR data for Cityscapes based on Segmentation [J]. Remote Sensing for Land & Resources, 2012, 3: 29-32. (in Chinese)
- 成晓倩, 樊良新, 赵红强. 基于图像分割技术的城区机载 LiDAR 数据滤波方法[J]. 国土资源遥感, 2012, 3: 29-32.
- [15] Zhang Xiaohong. Measuring Technique Theory and Method of Airborne LiDAR [M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2005, 105-106. (in Chinese)
- 张小红. 机载激光雷达测量技术理论与方法[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2005, 105-106.
- [16] George Sithole, George Vosselman. Experimental comparison of filter algorithms for bare-earth extraction from airborne laser scanning point clouds [J]. ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, 2004, 59: 85-101.
- [17] Liu Wen. Research on point clouds data classification based on both TerraScan and the principle mathematical morphology [D]. Qingdao: The State Oceanic Administration First Marine Research Institute, 2008. (in Chinese)
- 刘文. 基于数学形态学原理和 TerraScan 的 LiDAR 点云数据分类方法研究[D]. 青岛: 国家海洋局第一海洋研究所, 2008.