

改进的多级移动曲面拟合激光雷达数据滤波方法

孙崇利^{1,2}, 苏伟^{1,2}, 武红敢³, 刘睿^{1,2}, 刘婷^{1,2}, 黄健熙^{1,2}, 朱德海^{1,2}, 张晓东^{1,2}, 刘峻明^{1,2}

(1. 农业部农业信息获取技术重点实验室, 北京 100083; 2. 中国农业大学信息与电气工程学院, 北京 100083; 3. 中国林业科学研究院资源信息研究所, 北京 100091)

摘要: 激光雷达数据滤波是为了获取高精度数字高程模型而改进的多级移动曲面拟合滤波方法。预处理剔除了粗差点和大部分建筑物侧面回波点, 再通过格网化分, 建立数据索引, 相邻曲面保持一定的重叠度, 利用最小二乘法求解拟合曲面参数, 自动设置阈值后进行滤波。最后, 利用多尺度加权插值方法生成数字高程模型。采用国际摄影测量与遥感学会(ISPRS)提供的测试数据进行实验。结果表明: 改进的算法降低了三类误差产生的可能, 第一实验区的总误差由 8.39% 降低到 7.40%, 第二实验区的总误差由 6.39% 降低到 5.86%, 生成的数字高程模型满足精度要求, 具有推广性。

关键字: 激光雷达; 数据滤波; 自适应阈值; 多尺度加权插值

中图分类号: TP751.1 文献标志码: A 文章编号: 1007-2276(2013)02-0349-06

Improved hierarchical moving curved filtering method of LIDAR data

Sun Chongli^{1,2}, Su Wei^{1,2}, Wu Honggan³, Liu Rui^{1,2}, Liu Ting^{1,2}, Huang Jianxi^{1,2}, Zhu Dehai^{1,2}
Zhang Xiaodong^{1,2}, Liu Junming^{1,2}

(1. Key Laboratory of Agri-informatics, Ministry of Agriculture, P. R. China, Beijing 100083, China;
2. College of Information and Electrical Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China;
3. Chinese Academy of Forestry Resource Information Institute, Beijing 100091, China)

Abstract: LIDAR data filtering is to obtain high-precision digital elevation model of improved hierarchical moving curved fitting algorithm, removed the rough points and most of the buildings side points, by gridding points, data index were calculated, used the least squares fitting surface, the adjacent surfaces maintained a certain overlap degree, automatically set the threshold for processing the raw data. Finally, used the multi-scale weighted interpolation method to generate digital elevation model. Adopt test data provided by international photogrammetry and remote sensing society (ISPRS). Results show that the algorithm reduced three types error possibility, total error of filtering in first study area decreases from 8.39% to 7.40%, and the total error in the second study area decrease from 6.39% to 5.86%, the generated digital elevation model to meet the precision requirements, algorithm can be popularized.

Key words: LIDAR; data filtering; adaptive threshold; multi-scale weighted interpolation

收稿日期: 2012-06-10; 修订日期: 2012-07-20

基金项目: 国家自然科学基金(40801128); 中国农业大学基本科研业务费专项资金
(基于地基激光雷达数据的玉米冠层真实场景三维建模)

作者简介: 孙崇利(1984-), 男, 硕士生, 主要从事 LIDAR 数据分析处理与遥感图像处理方面的研究。Email: chonglisun@163.com

导师简介: 苏伟(1979-), 女, 副教授, 博士, 主要从事遥感数字图像处理及遥感应用方面的研究。Email: suwei@cau.edu.cn

0 引言

激光雷达(Light Detection And Ranging, LIDAR)是集激光测距技术、计算机技术、惯性测量单元(IMU)、差分定位技术于一身的系统^[1],直接获取地物表面三维坐标信息,实现地物立体结构信息提取和三维场景重建^[2],为快速获取高精度(几个厘米)的地球空间信息提供了一种全新的技术手段。激光雷达点云数据包含了地面点和地物点,许多应用需要从离散的点云数据中剔除地物点数据从而得到地面点数据,这个过程就是激光雷达数据滤波。滤波后的激光雷达数据可以插值生成高精度的数字高程模型(Digital Elevation Model, DEM),为地形特征的定量分析提供基础数据。因此,开展激光雷达数据滤波研究具有重要的理论价值和现实意义。

滤波^[3]是激光雷达数据处理最关键的步骤之一,是进行后续高层次数据处理的基础,其精度直接影响后续工作的精度。目前,已经有很多成熟的激光雷达点云滤波算法,概括起来主要有两类:(一)是直接针对激光脚点的三维空间坐标的滤波;(二)是融合了激光脚点的几何属性和回波强度信息的滤波。现在大多数的滤波方法都是集中在三维空间坐标进行的,比较有代表性的有基于形态学的滤波算法^[4]、基于坡度变化的滤波算法^[5]、基于内插的滤波算法^[6]、基于曲面约束的滤波算法^[7-9]等方法。ISPRS WG III -3 成员对现有的 8 种经典滤波算法进行了分析和比较^[9],得出传统滤波算法常常是针对某些特定的区域来进行,带有一定的区域局限性。在基于曲面约束的滤波算法基础上,国内的张小红提出了移动曲面拟合滤波算法^[10];台湾的林承毅和黄明哲提出了由粗到精的地形复原算法^[11],采用区域网格对点云数据进行二维空间排序,逐步缩小网格的大小,进行滤波的同时还原地形;苏伟等人提出了多级移动曲面拟合滤波算法^[12],建立区域网格索引搜索,不同的窗口获得不同层次的拟合曲面,设置自适应阈值,完成激光雷达数据点云的滤波。文中综合借鉴上述算法优点的基础上,发展了 IHMCFA (Improved Hierarchical Moving Curved Fitting Algorithm)算法。

1 方法原理

IHMCFA 滤波算法有 5 个步骤:(1) 预处理,包

括粗差点和建筑物侧面的无效回波点的去除;(2) 网格划分,相邻曲面间保持一定的重叠度,保持曲面的连续性,利用最小二乘法拟合求得拟合曲面参数,得到地形曲面的二次多项式的表达式;(3) 自动设定区域内阈值,进行地面点和地物点的粗分类;(4) 改变网格的大小,重复上述(2)-(3)步骤,多次迭代得到较准确的地形模型;(5) 利用多尺度加权插值生成 DEM。IHMCFA 滤波算法流程图,如图 1 所示。

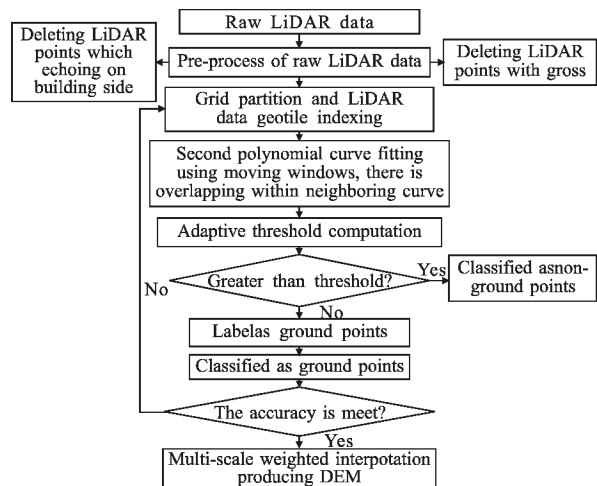


图 1 IHMCFA 滤波算法流程图

Fig.1 Flow chart of IHMCFA filtering algorithm

1.1 预处理

激光雷达主要测量地物顶面信息,然而由于视角、飞行姿态和地形起伏等多种原因,使原始激光雷达数据点存在粗差点和建筑物等侧面回波点。粗差点是激光雷达测量过程中,产生的高程极高点或极低点,由于粗差点的存在直接影响滤波与重建的精度,在滤波前需剔除粗差点。粗差点的判断基于一定距离范围内的高差进行,判断原理是:无论是地面点还是地物点,所分析点云与该点云领域范围内其他点云高程平均值的差值应该在一定范围内,如果差值大于一定的高程阈值或是小于一定的高程阈值,可以判断该点是否为粗差点^[13]。建筑物等侧面回波点通过其几何属性显示出来的,原理是水平距离较近,垂直高差较大,即它的空间立体角 θ 较大,可用角度限制原则,去除大部分侧面回波点^[14]。

空间任意点 $O(x_2, y_2, z_2)$ 与其邻域内某一点 $S(x_2, y_2, z_2)$ 的立体角度 θ (如图 2 所示),按照公式(1)计算,当 θ 大于某一阈值时,滤除侧面点,同时还保护了较低的地面点。

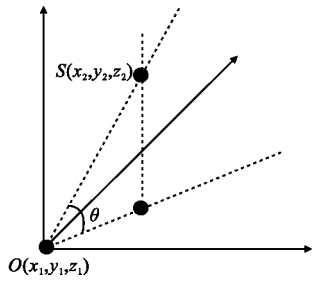


图 2 角度法去侧面点

Fig.2 Angle method removes side points

$$\theta = \tan^{-1}(|z_2 - z_1| / \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}) \quad (1)$$

1.2 点云数据格网化

将实验区的点云数据格网化即用规则的格网将实验区的点云数据全部覆盖,如图 3(a)所示。每个格网有三种不同的属性:(1) list 属性。记录落在每个格网内的点。根据点的坐标计算该点落在哪个格网内,并将该点的 x、y、z、强度信息记录该格网的 list 中;(2) 密度属性。记录每个格网中点的个数;(3) 标号属性。用二维矩阵的行列号对每个格网进行标号,如图 3(b)所示,在后面的计算中根据该标号进行点云资料的快速存储,提高滤波,插值计算速度^[15]。

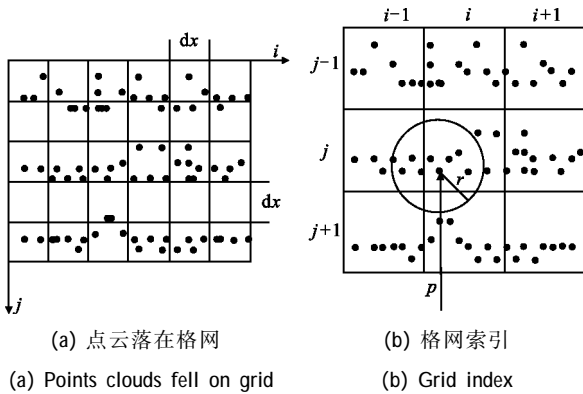


图 3 点云数据格网化

Fig.3 Point cloud data of grid

1.3 最小二乘法求解拟合曲面参数,建立拟合曲面

研究中,将落在真实地面上的激光点云用来拟合曲面,所得到的结果可以表达该地区真实地表起伏情况,将地形区进行分块,对每一区块根据其地形曲面特征进行曲面拟合,使得每一区块都用不同的曲面方程表达,该阶段的关键问题是如何进行合理分块和如何保证每个分块之间曲面的连续性。合理分块的原则是各区块格网中至少有一个真实地面点,实现方式是选取区域内最大建筑物的最大边长

为格网大小;为保证分块之间的平滑连接,相邻分块之间保持一定的重叠度。该研究利用最小二乘法求解拟合曲面参数,建立拟合曲面的具体方程可示为:

$$z_i = f(x_i, y_i) = a_0 + a_1x_i + a_2y_i + a_3x_i^2 + a_4xy_i + a_5y_i^2 \quad (2)$$

1.4 自适应阈值的确定

对原始激光点云数据预处理后,大部分的建筑物侧面点、部分植被点、粗差点被去除,激光点云被分为上下两层的同质区域,在拟合出最佳地形曲面方程后,每个激光点云都会有一个拟合高程值,如果一点为地面点,那么它的原始高程和拟合高程高差比较小,如果一点为地物点,那么它的原始高程和拟合高程高差比较大。根据这一规律,将拟合高差相近的点归于同一类^[16]。

自适应阈值确定流程如下:

(1) 拟合高差之差排序。由最小距离法可知,先将 N 个拟合高差数据从小到大顺序排列,假设经排序后,设 $x_1 < x_2 < \dots < x_n$, 计算出相邻两个数据间距离,并按照从大到小顺序排列成 $l_1 > l_2 > l_3 > \dots > l_{n-1}$ 。

(2) 计算类的属性。找到以 l_1 为间隔的两个数据,从中截断可分为两类,在真阈值不知道的情况下,要确定分类的条件只能借助于自身的数据的特征,即类间距离,类的直径(同一类中最大数据和最小数据的差),类的中心(同一类中最大数据与最小数据的算术平均数)。

(3) 确定阈值。将 A 分成 A_1 和 A_2 两类, A_1 和 A_2 的类间距离为 l_1 , 两类直径分别为 Q_1 和 Q_2 , 两类的中心距离为 O_1 和 O_2 , 则这些参数必须满足条件: $l_1 \geq \max\{Q_1, Q_2\}$, 或者当 $l_1 < \max\{Q_1, Q_2\}$ 时, 满足条件 $l_1 > \min\{Q_1, Q_2\}$, 且 $(O_1 + O_2) / 2 \in A_1$ 或 A_2 。阈值的取值规定如下, 设 A 中相邻两个数间距离最大的两个值 l_1 和 l_2 , 且 $l_1 > l_2$, 当 A 分成两类时, 且两类的最大直径为 Q^* 时, 当 $Q^* \leq l_1 \leq 2Q^*$ 时, 阈值取值为 l_2 处的阈值拟合高差, 其他情况下, 阈值取值为 l_1 处的阈值拟合高差。

阈值的确定应用了上述理论知识, 根据滤波地形的实际情况, 在不同格网大小的情况下自动设置阈值, 最大可能避免了以往手动设置同一阈值而产生的过度滤波或是不完全滤波问题。

1.5 多尺度加权插值

将激光雷达数据的地物点去除后, 这些位置上就成为数据空洞, 需要进行估算出该位置上的地面

点高程数据,即插值。文中在反距离加权插值的基础上提出了一种多尺度加权插值方法,如图 4 所示。

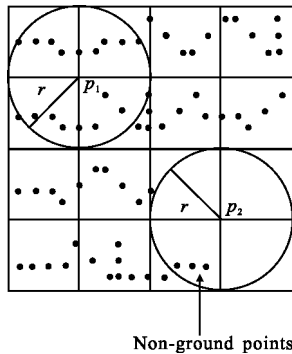


图 4 多尺度加权插值示意图

Fig.4 Multi-scale weighted interpolation schematic diagram

方法原理:(1) 根据DEM的分辨率,设置格网大小,以格网的交叉点为圆心、分辨率为搜索半径,搜索四邻域格网内的点;(2) 利用反距离加权插值估算出每个点的高程值,取4个顶点的平均值作为格网的高程值。

这里需要考虑以下两点:(1) 插值过程中如果离格网交叉点近的点为地物点,插值得到的高程值会偏大。由于滤波后地物点多数为孤立点,所以在插值过程中通过限定格网插值点个数进行处理;(2) 插值区域内计算无点处的高程值。插值过程中在没有点的区域内,将四邻域格网的高程值平均值赋予该格网,用其邻域高程信息赋予该格网。

2 实验区概况与数据源

该研究实验数据来自 ISPRS 点云滤波测试数据中的两个实验区。第一实验区有高大的建筑物、小物体(汽车)、低矮植被等分布,地形比较平缓,属于典型的城市区域,激光点云为 52 119 个,参考地面点为 26 691 个;第二实验区有粗差点,分布有高大建筑物、植被、建筑物与植被混合区,地面比较平缓,激光点云为 28862 个,参考地面点云为 15 556 个。

3 实验结果与分析

3.1 目视评价

目视评价整体效果图,由滤波前原始点云数据如图 5(a)、(b)和滤波后地面数据如图 5(c)、(d)对比,可以明显看出,第一实验区中的建筑物、低矮植被大

部分被滤除,并有效保持了道路等细节信息;第二实验区中的高大建筑物与其之间的植被、开阔地带高低混合物大部分被滤除,并有效的保持了地形细节信息。证明了滤波后有效滤除地物点的同时,地面细节信息保持较好,达到了算法设计时的要求。

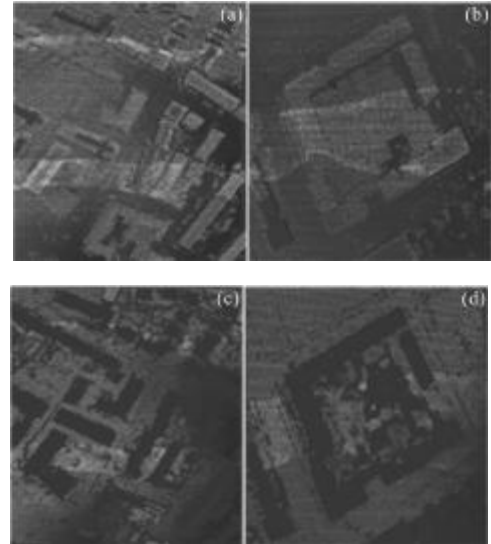


图 5 滤波前后结果对比

Fig.5 Comparison of the results before and after filtering

3.2 定量评价

一般来说,滤波的误差可以分为三类:第一类误差、第二类误差和总误差。第一类误差是将地面点判断为地物点,第二类误差是将地物点判断为地面点,总误差是上述两类误差加权求和。三种误差比率的计算公式见表 1。表 1 中,e 和 f 分别为参考数据中地面点和地物点的个数;g 和 h 分别为滤波后数据中地面点和地物点的个数;n 为激光雷达数据点总个数; $b/e \times 100\%$ 为第一类误差率; $c/f \times 100\%$ 为第二类误差率; $(b+c)/n \times 100\%$ 为总误差率。

表 1 滤波错误率定义

Tab.1 Error rate definition

Referenced	Filtered results		Total of referenced points	Error rate
	Ground points	Non-ground points		
Ground points	a	b	$e=a+b$	Type I $b/e \times 100\%$
Non-ground points	c	d	$f=c+d$	Type II $c/f \times 100\%$
Total of filtered points	$g=a+c$	$h=b+d$	$n=a+b+c+d$	Total $(b+c)/n \times 100\%$

文中滤波算法和 8 大经典滤波算法中的 Shon 的滤波算法进行滤波结果比较,统计三种误差率。在第一实验区的滤波结果误差统计见表 2,Shon 的滤波算法的三种误差率分别为 8.87%,7.87%,8.39%,文中滤波算法的误差率分别为 7.38%,7.42%,7.40%;在第二实验区的滤波结果误差统计见表 3,Shon 的滤波算法的三种误差率分别为 4.81%,8.28%,6.39%,文中滤波算法的误差率分别为 4.08%,7.91%,5.86%。由滤波误差统计结果可以看出,文中方法在第一类误差、第二类误差以及总误差均变小,而且文中对实验区内的所有点都进行滤波,Shon 方法没有对所有点进行滤波。

表 2 第一实验区中 IHMCFA 和 Shon 滤波结果统计
Tab.2 IHMCFA and Shon filtering result statistic

Filter method	Referenced	Filtered results		Total of referenced points	Error Rate/%
		Ground points	Non-ground points		
IHMCFA	Ground points	24 721	1 970	26 691	Type I 7.38%
	Non-ground points	1 889	23 539	25 428	Type II 7.42%
	Total of filtered points	26 610	25 509	52 119	Total 7.40%
Shon	Ground points	24 297	2 366	26 663	Type I 8.87%
	Non-ground points	1 915	22 891	24 847	Type II 7.87%
	Total of filtered points	6 253	25 257	51 510	Total 8.39%

表 3 第二实验区中 IHMCFA 和 Shon 滤波结果统计
Tab.3 IHMCFA and Shon filtering result statistic

Filter method	Referenced	Filtered results		Total of referenced points	Error rate/%
		Ground points	Non-ground points		
IHMCFA	Ground points	14 920	636	15 556	Type I 4.08%
	Non-ground points	1 056	12 250	13 306	Type II 7.91%
	Total of filtered points	15 976	12 886	28 862	Total 5.86%
Shon	Ground points	14 757	746	15 503	Type I 4.81%
	Non-ground points	1 071	11 864	12 935	Type II 8.28%
	Total of filtered points	15 828	12 610	28 438	Total 6.39%

3.3 插值精度评价

该研究中插值精度评价使用检验点法进行,即对生成的 DEM 在某些特征点处进行检查,将这些点处的内插高程与实际高程逐一比较得到各点的错误,计算出中错误^[17],DEM 的精度可表示为:

$$\delta_{DEM}^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (R_i - Z_i)^2 \quad (3)$$

式中:n 为检查点个数,R_i 为检查点内插高程值,Z_i 为检查点实际高程值。

两个实验区选择在空地和道路上验证精度。第一实验区的插值精度评价结果见表 5,大部分的空地地区插值结果很理想,差值在 0.20 左右,在道路地方有些偏高,差值在 0.60 左右,和选择的地区存在地物点有关;第一实验区的插值精度评价结果见表 6,空地较为理想,差值在 0.25 左右,在道路地方有些偏高,差值在 0.60 左右,和选择的地区存在植被点有关。由中错误结果可知,插值结果是比较理想的,符合 DEM 精度要求。

表 4 第一实验区插值精度评价结果

Tab.4 Interpolation precision evaluation results of the first experimental area

Test areas	Elevation of raw LiDAR data Z _i (m)	Elevation of interpolation R _i (m)	Difference of Z _i and R _i (m)
Vacant land 1	330.69	330.55	0.14
Vacant land 2	330.60	330.39	0.21
Vacant land 3	330.53	330.37	0.18
Road 1	330.93	330.34	0.59
Road 2	330.97	330.42	0.55

表 5 第二实验区插值精度评价结果

Tab.5 Interpolation precision evaluation results of the second experimental area

Test areas	Elevation of raw LiDAR data Z _i (m)	Elevation of interpolation R _i (m)	Difference of Z _i and R _i (m)
Vacant land 1	308.53	308.48	0.05
Vacant land 2	307.15	306.89	0.26
Vacant land 3	310.67	310.47	0.20
Road 1	312.34	311.76	0.58
Road 2	315.15	314.68	0.47

4 结 论

文中融合了滤波中基于曲面拟合和分类的思想,提出了一种改进的多级移动曲面拟合激光雷达数据滤波方法滤波算法。实验证明:该方法稳定性、普适性较好,效率高,解决了粗差点、曲面不连续,阈值自动设置等问题,降低了三种滤波误差率,生成的DEM符合精度要求。该方法不足之处在于,预处理和滤波时需要人为设定参数,有些参数需要先验信息如格网大小等,其自适应性有待于提高;以后的研究中可以把回波强度信息融合到算法中,提高激光雷达数据滤波的精度。

参考文献:

- [1] Liu Jingnan, Zhang Xiaohong. Progress of airborne laser scanning altimetry [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2003, 28(2): 132-137. (in Chinese)
刘经南, 张小红. 激光扫描测高技术的发展与现状 [J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2003, 28(2): 132-137.
- [2] You Hongjian, Su Lin, Li Shukai. 3D building reconstruction based on scanning laser rangerfinder data[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2005, 20(4): 381-385. (in Chinese)
尤红建, 苏林, 李树楷. 基于扫描激光测距数据的建筑物三维重建[J]. *遥感技术与应用*, 2005, 20(4): 381-385.
- [3] Liu Jingnan, Xu Xiaodong, Zhang Xiaohong, et al. Adaptive hierarchical and weighted iterative filtering of airborne LIDAR data and its quality assessment [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2008, 33(6): 551-555. (in Chinese)
刘经南, 许晓东, 张小红, 等. 机载激光扫描测高数据分层迭代选权滤波方法及其质量评价[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2008, 33(6): 551-555.
- [4] Weidner U, Forstner W. Towards automatic building extraction from high resolution digital elevation models [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 1995, 50(4): 38-49.
- [5] Vosselman G. Slope based filtering of laser altimetry data [J]. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2000, 33(B3): 935-942.
- [6] 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.
- [7] Pfeifer N, Reiter T, Briese C, Rieger W. Interpolation of high quality ground models from laser scanner data in forested areas [J]. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 1999, 32(3): 31-36.
- [8] Sithole G. Filtering of Laser altimetry data using a slope adaptive filter [J]. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2001, 34(3-4): 203-210
- [9] Vosselman G. Experimental comparison of filter algorithms for bare-earth extraction from air-borne laser scanning point clouds [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2004, 59(1-2): 85-101.
- [10] Zhang Xiaohong. Airborne laser scanning altimetry data filtering and features extraction [D]. Wuhan: Wuhan University, 2002. (in Chinese)
- [11] Lin Chengyi. The study of DEM generation from airborne laser scanning data [D]. Taiwan: National Kaohsiung University of Applied Sciences, 2004. (in Chinese)
- [12] Su Wei, Sun Zhongping, Zhao Dongling, et al. Hierarchical moving curved fitting filtering method based on LIDAR data [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2009, 13(05): 833-839. (in Chinese)
苏伟, 孙中平, 赵冬玲, 等. 多级移动曲面拟合 LIDAR 数据滤波算法[J]. *遥感学报*, 2009, 13(05): 833-839.
- [13] Wang Minghua, Zhang Xiaohong, Zeng Tao, et al. Procassing algorithms for filtering arbrne LIDAR data [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2010, 35(02): 224-227.
- [14] Zeng Qihong, Mao Jianhua, Li Xianhua, et al. Planar-fitting filtering algorithm for LIDAR points cloud [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2008, 33(1): 25-28. (in Chinese)
- [15] Zhang Qiyong, Cen Minyi, Hang Fen et al. Quickly extracting DEM from LiDAR data based on spatial data index[J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2010, 35(3):70-73. (in Chinese)
- [16] Cai Feina. Digital filter threshold algorithm based on clustering analysis [J]. *Journal of Data Acquisition & Processing*, 2006, 21(2): 234-238. (in Chinese)
- [17] Tao Guoqiang. Grid digital elevation model algorithm-interpolating and accuracy analysis [D]. Nanjing: The 10th Surveying and Mapping Academic Communication Conference in East China, 2007: 110-113. (in Chinese)