

抗差估计在机载激光雷达点云滤波中的应用

刘志青 李鹏程 张保明 郭海涛 丁磊

信息工程大学地理空间信息学院, 河南 郑州 450052

摘要 机载激光雷达(Lidar)点云数据滤波是Lidar数据后处理研究的重点和难点之一,也是首要解决的问题。传统曲面约束滤波算法利用最小二乘法拟合地形曲面,易受种子点粗差影响。针对这一问题,引入抗差估计理论改善曲面拟合效果,并设计自适应阈值确定的方法区分地面点与地物点。使用国际摄影测量与遥感学会(ISPRS)测试数据进行实验,与传统的8种经典滤波方法进行对比,实验结果表明,抗差估计能得到更为合理的拟合曲面,获取的滤波结果非常可靠,对各种地形的适应性较强,具备较高实用价值。

关键词 遥感;激光雷达;数据滤波;抗差估计;点云

中图分类号 P237 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP52.122801

Application of Robust Estimation to Airborne Lidar Point Cloud Filtering

Liu Zhiqing Li Pengcheng Zhang Baoming Guo Haitao Ding Lei

Institute of Geospatial Information, Information Engineering University, Zhengzhou, Henan 450052, China

Abstract Airborne Lidar point cloud data filtering is one of the difficulties and emphases in the study of Lidar data post-processing, and also the primary problem needed to be solved. Least squares adjustment is used to fit block terrain in traditional moving curved fitting filtering method, but this method is sensitive to outliers. Aiming at solving this disadvantage, robust estimation theory is introduced to fit block terrain more reasonably, and self-adaption threshold is set to distinguish between ground and non-ground points automatically. The test data provided by International Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ISPRS) are adopted for experiment. Compared with 8 classical filtering methods, experimental results prove that, robust estimation can provide more reasonable fitting curve, which means that the proposed method is practical with reliable filtering results and has strong adaptability to various terrains.

Key words remote sensing; Lidar; data filtering; robust estimation; point cloud

OCIS codes 280.3640; 280.1350; 140.3538

1 引言

机载激光雷达(Lidar)技术是一种综合应用激光测距、全球定位系统、惯性导航测定的快速测量技术,在地形测绘、环境规划、3维数字城市建模及森林植被参数测定等方面得到广泛应用^[1]。点云数据滤波结果为后续的点云分类、建筑物与植被3维建模等处理提供先验知识引导^[2],是机载Lidar点云数据后处理中首要解决的问题。点云数据滤波的主要目的是准确分离散点云中的地面点与地物点。

现有滤波算法主要分为以下4种:形态学滤波法^[3-6]、逐步加密滤波法^[7]、最小二乘拟合预测法^[8]以及曲面约束法^[9-11]。针对单一地形环境,大部分滤波算法都可以取得理想效果,但没有哪种算法可以适合各种地形条件^[12]。曲面约束算法可以保持良好的地形特征,对于后期构建数字高程模型(DEM)非常有益。但是该算法存在以下缺点:1)在曲面拟合过程中均利用选取的地面种子点作最小二乘平差处理,尽管最小二乘法能够减小一定的随机误差,然而,当种子点中存在粗差时,最小二乘法的计算结果与实际曲面会出现较大偏

收稿日期: 2015-05-29; 收到修改稿日期: 2015-06-26; 网络出版日期: 2015-10-11

基金项目: 国家自然科学基金(41371436)

作者简介: 刘志青(1986—),女,博士研究生,主要从事数字摄影测量与激光雷达方面的研究。

E-mail: lpc1987212@163.com

导师简介: 张保明(1961—),男,硕士,教授,主要从事数字摄影测量和数字图像处理等方面的研究。

E-mail: zbm1960@163.com

差;2) 阈值设置需要人机交互,自动化程度低。针对以上问题,本文在曲面约束滤波过程中引入抗差估计理论并设计自适应阈值确定方法。

2 最小二乘法曲面拟合理论

最小二乘法是一种数学优化算法,一种逼近理论,也是观测数据进行拟合时最常用的一种算法,其主旨是使得测量值与真实值之间的偏差平方和最小。利用最小二乘法进行曲面拟合时,并不是通过已知数据观测值获取曲面,而是根据脚点在拟合曲面上的高程值与采集高程值之差的平方和达到最小求得。

选取点云数据一定尺寸大小的区域内若干个高程最低脚点作为种子点,利用这些种子点对对应范围内的地形进行拟合,选择二次曲面方程,表示为

$$Z_i = a_1 + a_2 X_i + a_3 Y_i + a_4 X_i^2 + a_5 X_i Y_i + a_6 Y_i^2, \quad (1)$$

式中 $a_s (s=0, \dots, 6)$ 为二次多项式系数, X_i 、 Y_i 及 Z_i 为脚点 i 的 3 维坐标值。

二次多项式曲面方程需要求解 6 个待定系数,当参考点数大于等于 6 时,利用最小二乘法可以求出方程的最优解。参考点数越多,提供的多余观测数越多,求出的系数越准确,拟合的曲面就越接近真实地形。(1) 式的误差方程表示为

$$v = \begin{bmatrix} 1 & X_1 & Y_1 & X_1^2 & X_1 Y_1 & Y_1^2 \\ 1 & X_2 & Y_2 & X_2^2 & X_2 Y_2 & Y_2^2 \\ & & & \vdots & & \\ 1 & X_n & Y_n & X_n^2 & X_n Y_n & Y_n^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \\ a_5 \\ a_6 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Z_1 \\ Z_2 \\ \vdots \\ Z_n \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中 v 为改正数向量。

3 抗差估计曲面拟合理论

与最小二乘法追求估计值优越性和无偏性不同,抗差估计致力于研究估计值的实际抗差性和可靠性,在许多领域显示出强大的生命力。抗差估计又称为稳健估计,其方法具有一定的“抗干扰性”,抗差性意义在于当观测样本中混入少量粗差时,对估计量数值影响较小。因此,针对传统曲面约束法存在的问题,本文引入抗差估计理论实现更有效的 Lidar 点云数据滤波。

通过最小二乘方法对地形局部起伏明显的区域进行拟合时难以抵制局部地形异常现象,利用抗差估计进行曲面拟合则可以解决这一问题。基于抗差估计的曲面拟合原理是将局部变化视为异常观测,在迭代过程中判断标准化残差大小,通过对采样点数据权大小进行调整来达到减小或剔除异常值对内插成果影响的目的^[13-14],从而获取更为合理的曲面。

可将任意区块地形视为光滑的数学曲面,通过建立多项式函数模型对其进行拟合,即

$$\hat{Z} = \sum_{u=0}^m \sum_{r=0}^m a_{ur} X^u Y^r, \quad (3)$$

式中 $a_{ur} (u=0, \dots, m, r=0, \dots, m)$ 为待求多项式系数, (X, Y) 为点平面坐标, \hat{Z} 为拟合高程值, m 为模型的阶次,一般取 2,即二次曲面。

设有误差方程为

$$V = A\hat{X} - l, \quad (4)$$

式中 V 为观测值残差向量, A 为系数矩阵, \hat{X} 为曲面方程中需要求解的未知数, l 为观测向量。根据抗差估计理论能够构造如下极值条件:

$$\sum_{i=0}^n P_i \rho(v_i) = V_{\min}, \quad (5)$$

式中 P_i 为第 i 个观测量权值, ρ 为凸函数, v_i 为第 i 个残差。对(5)式求极值 V_{\min} , 利用等价权理论得

$$\hat{X}^k = (A^T \bar{P}^k A)^{-1} A^T \bar{P}^k l, \quad (6)$$

式中 \bar{P}^k 为观测等价权矩阵,其元素可利用 IGGI-II 函数确定,即

$$\bar{P}_i^k = \begin{cases} P_i, & |\tilde{v}_i^k| \leq c_0 \\ P_i \frac{c_0}{|\tilde{v}_i^k|} \frac{(c_1 - |\tilde{v}_i^k|)^2}{(c_1 - c_0)^2}, & c_0 < |\tilde{v}_i^k| \leq c_1, \\ 0, & |\tilde{v}_i^k| > c_1 \end{cases} \quad (7)$$

其中, $c_0 = 1.0 \sim 1.5$, $c_1 = 3.0 \sim 8.0$, \tilde{v}_i^k 为第 i 个采样点经 k 次迭代后的标准化残差^[15], 即

$$\tilde{v}_i^k = v_i^k / \sigma_{v_i}, \quad (8)$$

其中, σ_{v_i} 为 v_i 的标准差。

4 自适应阈值确定

通过抗差估计方法完成区块内地形拟合后, 可以计算得到区块内每个激光脚点的拟合高程值。通过对该脚点采集高程值与拟合高程值的大小进行比较可以区分地面点与非地面点, 若高程差值小于阈值判断为地面点, 否则为非地面部分。基于以上推论, 自适应阈值的计算公式表示为

$$\Delta H_{th} = M \times \sqrt{V^T P V / (n - t)}, \quad (9)$$

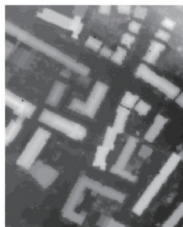

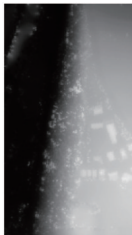
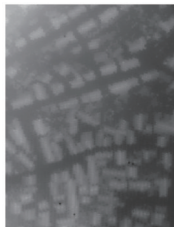
式中 n 为观测值个数, t 为参数个数, M 是单位权中误差倍数, $\sqrt{V^T P V / (n - t)}$ 为单位权中误差, 曲面拟合后的单位权中误差可在抗差估计拟合过程中计算获得。区块的拟合结果是否可靠与单位权中误差有关, 区块拟合的中误差越小, 说明该区块的拟合结果越可靠, 应该设置更为严格的高差阈值; 反之, 单位权中误差越大, 说明区块内具有复杂地形, 高差阈值应设置得相对松弛。机载 Lidar 点云精度一般为 20 cm, 如果拟合结果可靠, 则单位权中误差应小于 3 倍点云精度, 即 0.6 m。即当 $\sqrt{V^T P V / (n - t)} \leq 0.6$ 时, M 取 3; 当 $\sqrt{V^T P V / (n - t)} > 0.6$ 时, M 取 5。

5 实验与分析

5.1 实验数据

为客观验证该算法的滤波精度, 从国际摄影测量与遥感学会 (ISPRS) 发布的测试数据选取 4 个测区进行滤波实验^[12], 测试区基本情况如表 1 所示。

表 1 测区数据基本情况
Table 1 Situation of test data

Area	Samp12	Samp31	Samp51	Samp54
Points number	52119	28862	17845	8608
Description	Small object (car)	Discontinuous terrain (courtyard), low points	Vegetation on the slope	Few points on the building
Distance image				

利用滤波算法对样本数据 Samp12、Samp31、Samp51 及 Samp54 进行滤波处理。对上述 4 个测试区域滤波结果进行定性与定量评价同时和传统滤波算法进行比较, 包括与 8 种经典滤波算法^[12]处理结果进行精度比较以及区块拟合过程中计算的中误差比较, 最后分析地面激光脚点生成 DEM 的效果来验证滤波算法的可靠性和适应性。

5.2 结果与分析

图 1 所示为表 1 所述 4 个测试区域的滤波结果, 其中图 1(a)、(c)、(e)、(g) 分别表示 Samp12、Samp31、Samp51

及 Samp54 的原始激光脚点,图 1(b)、(d)、(f)、(h)则分别表示 4 个测试区域滤波后保留的地面脚点。显然,建筑物、植被等非地面部分被有效滤除,地形细节信息也得到有效保留。从定性评价来看,该算法达到滤波要求。

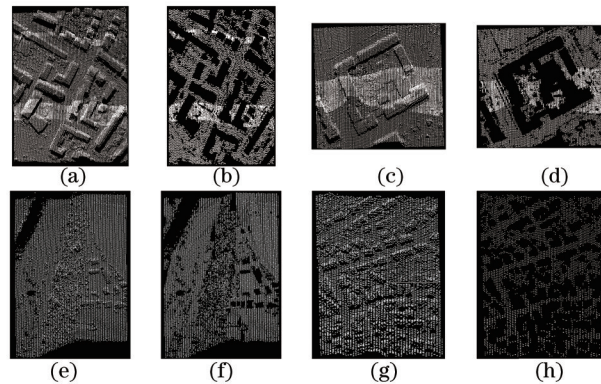


图 1 测试区域滤波结果。(a) Samp12、(c) Samp31、(e) Samp51 和 (g) Samp54 的原始激光脚点;(b) Samp12、(d) Samp31、(f) Samp51 和 (h) Samp54 的滤波结果

Fig.1 Filtering result of samples. Original point cloud in (a) Samp12, (c) Samp31, (e) Samp51 and (g) Samp54; filtering result of (b)Samp12, (d) Samp31, (f) Samp51 and (h) Samp54

定量评价方面,采取滤波错误率统计的方法对滤波结果进行定量分析。滤波错误率包括 I 类错误率、II 类错误率与总错误率。I 类错误率是指地面点错分为非地面点的比率,II 类错误率是非地面点误标记为地面点的比率,所有判断错误的脚点数除以总脚点数得到总错误率。算法适应性主要体现在 I、II 类错误率,算法可行性则由总错误率反映^[6]。表 2 为 4 个测试区域的滤波错误率统计结果,并与 ISPRS 测试报告中的滤波算法进行比较。通过与几种经典方法进行比较可以发现,该算法的 3 类误差率均显著低于经典算法的误差最大值,证明该算法对各种特征的地形有较好的适应性,能够获得可靠的滤波结果。

表 2 3 类滤波误差统计

Table 2 Statistics of 3 types of filtering error

Sample	Error	Elmqvist	Sohn	Axelsson	Pfeifer	Brovelli	Roggero	Wack	Sithole	Our method
Samp12	Type I	12.36%	8.87%	4.89%	7.29%	29.63%	11.92%	11.94%	19.19%	7.28%
	Type II	3.30%	7.87%	1.48%	1.52%	2.04%	0.91%	0.89%	0.57%	2.08%
	Total	8.18%	8.39%	3.25%	4.50%	16.28%	6.61%	6.61%	10.21%	4.74%
Samp31	Type I	8.47%	4.81%	7.91%	1.60%	21.75%	3.03%	3.15%	4.85%	4.02%
	Type II	2.33%	8.28%	1.03%	2.04%	3.39%	1.08%	1.09%	1.12%	1.65%
	Total	5.34%	6.39%	4.78%	1.80%	12.92%	2.14%	2.21%	3.15%	2.92%
Samp51	Type I	49.34%	10.33%	0.13%	4.21%	28.23%	1.90%	14.03%	7.03%	4.00%
	Type II	1.60%	5.68%	12.00%	1.93%	3.64%	6.96%	2.23%	6.99%	6.80%
	Total	21.31%	9.31%	2.72%	3.71%	22.81%	3.01%	11.45%	7.02%	4.61%
Samp54	Type I	27.91%	6.72%	1.25%	10.66%	49.54%	1.01%	15.93%	12.38%	4.06%
	Type II	2.63%	4.79%	4.93%	1.00%	1.97%	8.37%	0.48%	1.11%	3.50%
	Total	21.26%	5.68%	3.23%	5.47%	23.89%	4.96%	7.63%	6.33%	3.76%

引入抗差估计理论拟合区块地形是算法的创新之处,该方法能够控制局部异常起伏对整体趋势面拟合的影响。图 2(a)、(b)分别表示对 Samp12 及 Samp31 滤波处理过程中利用抗差估计与最小二乘法进行拟合区块时计算的单位权中误差,图中红色折线表示抗差估计计算的中误差结果,黑色折线表示最小二乘法得到的中误差统计。可以看出传统方法在某些区块会出现较大误差,而采用抗差估计拟合的中误差都小于 2,由此证明基于抗差估计的滤波方法更加合理,滤波结果更加可靠。

机载 Lidar 点云滤波的重要应用之一是生成 DEM,对 DEM 的生成效果进行分析进一步验证该算法的有效性与实用性。图 3 表示 Samp12、Samp31、Samp51 及 Samp54 生成 DEM 情况,其中图 3(a)、(d)、(g)、(j)为所有激光脚点生成的 DSM,图 3(b)、(e)、(h)、(k)为该算法滤波结果生成的 DEM,图 3(c)、(f)、(i)、(l)为 ISPRS 提供的参考 DEM。可以看出,DSM 中的植被与建筑物等非地面部分基本被有效滤除,生成 DEM 与参考 DEM 接近,说明该算法滤波效果明显,能够满足实际应用需求。

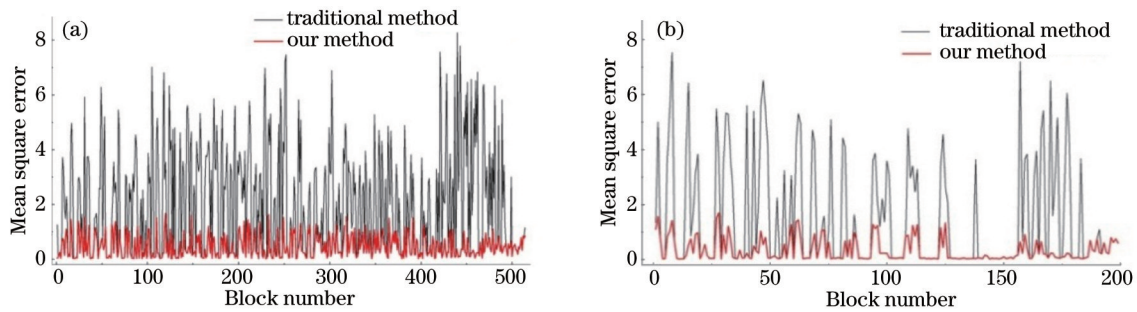


图2 测区中均方误差统计。(a) Samp12; (b) Samp31

Fig.2 Statistics of mean square error in samples. (a) Samp12; (b) Samp31

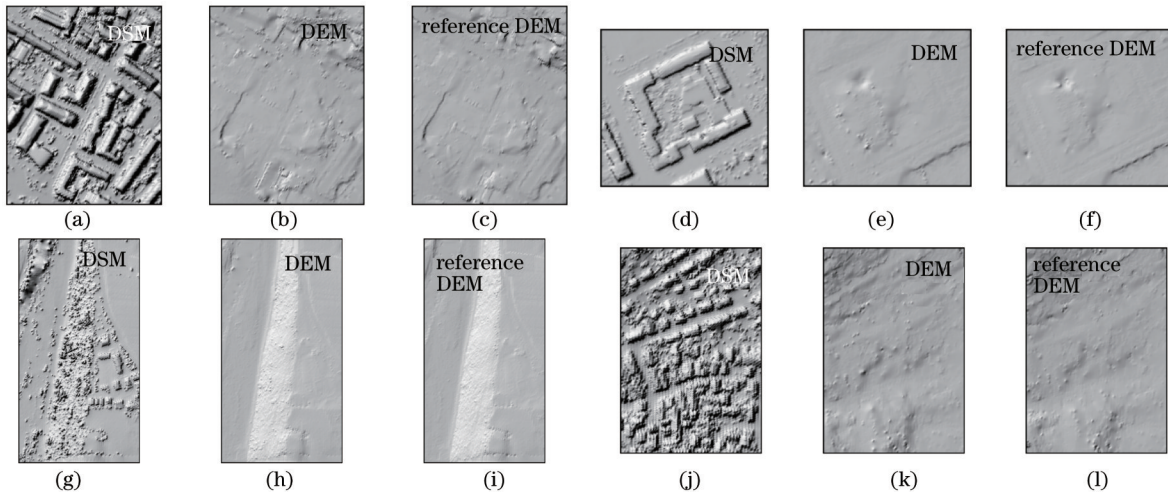


图3 测试区 DEM。(a)~(c) Samp12; (d)~(f) Samp31; (g)~(i) Samp51; (j)~(l) Samp54

Fig.3 DEM of samples. (a)~(c) Samp12; (d)~(f) Samp31; (g)~(i) Samp51; (j)~(l) Samp54

6 结 论

针对曲面拟合滤波算法存在的问题,将抗差估计原理与自适应阈值确定方法成功应用于滤波处理过程中。实验结果表明:相比传统最小二乘方法,抗差估计得到的单位权中误差得到极大改善,因此拟合地形曲面更加可靠;设置自适应阈值完成地面点与非地面点的判断,提高了算法的自动化程度;实现了基于抗差估计的机载 Lidar 点云数据滤波算法,有效滤除了建筑物、植被等非地面部分;滤波后地面点云生成 DEM 质量可靠,证明算法具备较高的实用价值。

参 考 文 献

- Lai Xudong. Principle and Application of Airborne LiDAR[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2010.
赖旭东. 机载激光雷达基础原理与应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2010.
- Zuo Zhiqun, Zhang Zuxun, Zhang Jianqing. Classification of LiDAR point clouds for urban area based on multi-echo region ratio and recognition topology model [J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(4): 0414001.
左志权, 张祖勋, 张剑清. 区域回波比率与拓扑识别模型结合的城区激光雷达点云分类方法[J]. 中国激光, 2012, 39(4): 0414001.
- Sui Lichun, Zhang Yibin, Liu Yan, *et al.*. Filtering of airborne LiDAR point cloud data based on the adaptive mathematical morphology[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2010, 39(4): 390-396.
隋立春, 张熠斌, 柳 艳, 等. 基于改进的数学形态学算法的 LiDAR 点云数据滤波[J]. 测绘学报, 2010, 39(4): 390-396.
- Zhang K Q, Chen S C, Whiteman D, *et al.*. A progressive morphological filter for removing nonground measurements from airborne LIDAR data[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2003, 41(4): 872-882.
- Zhao Mingbo, He Jun, Tian Junsheng, *et al.*. Lidar data filtering method based on improved progressive multi-scale mathematic morphology[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(3): 0328001.
赵明波, 何 峻, 田军生, 等. 基于改进的渐进多尺度数学形态学的激光雷达数据滤波方法[J]. 光学学报, 2013, 33(3):

- 0328001.
- 6 Miao Qiguang, Guo Xue, Song Jianfeng, *et al.*. LiDAR point cloud data with morphological filter algorithm based on region prediction[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, 52(1): 011003.
苗启广, 郭雪, 宋建锋, 等. 基于区域预测的LiDAR点云数据形态学滤波算法[J]. *激光与光电子学进展*, 2015, 52(1): 011003.
- 7 Axelsson P. DEM generation from laser scanner data using adaptive TIN models[J]. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2000, 33(B4/1;PART4): 110-117.
- 8 Kraus K, Pfeifer N. Determination of terrain models on wooded areas with aerial laser scanner data[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 1998, 53(4): 193-203.
- 9 Zhang Xiaohong. *Theory and Method of Airborne LiDAR Measuring Technology*[M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2007.
张小红. *机载LiDAR测量技术理论与方法*[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2007.
- 10 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(5): 833-838.
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(5): 833-838.
- 11 Sun Chongli, Su Wei, Wu Honggan, *et al.*. Improved hierarchical moving curved fitting filtering method of LiDAR data [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(2): 349-354.
孙崇利, 苏伟, 武红敢, 等. 改进的多级移动曲面拟合激光雷达数据滤波方法[J]. *红外与激光工程*, 2013, 42(2): 349-354.
- 12 Vosselman G. Experimental comparison of filter algorithms for bare-earth extraction from air-borne laser scanning point clouds[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 2004, 59(1-2): 85-101.
- 13 Yang Yuanxi. *The Theory and Application of Robust Estimation*[M]. Beijing: Ba-yi Publishing House, 1993.
杨元喜. *抗差估计理论及其应用*[M]. 北京: 八一出版社, 1993.
- 14 Yang Yuanxi. Adaptively robust least squares estimation[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 1996, 25(3): 206-211.
杨元喜. 自适应抗差最小二乘估计[J]. *测绘学报*, 1996, 25(3): 206-211.
- 15 Zhang Juqing, Liu Pingzhi. Combining fitting based on robust trend surface and orthogonal multiquadrics with application in DEM fitting[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2008, 37(4): 526-530.
张菊清, 刘平芝. 抗差趋势面与正交多面函数结合拟合DEM数据[J]. *测绘学报*, 2008, 37(4): 526-530.
- 16 Huang Xianfeng, Li Hui, Wang Xiao, *et al.*. Filter algorithms of airborne LiDAR data: Review and prospects[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2009, 38(5): 466-469.
黄先锋, 李卉, 王潇, 等. 机载LiDAR数据滤波方法评述[J]. *测绘学报*, 2009, 38(5): 466-469.

栏目编辑: 史敏