文章编号:1673-5005(2013)01-0056-05 doi:10.3969/j.issn.1673-5005.2013.01.009

基于曲率统计的 LiDAR 点云二次滤波方法

万剑华[1], 黄荣刚[1], 周 行[2], 曾 喆[1]

(1. 中国石油大学 地球科学与技术学院,山东 青岛 266580; 2. 中国石油大学 地球科学学院,北京 102249)

摘要:针对传统偏度平衡方法滤波结果中存在低矮植被、建筑物侧面墙脚等非地面点云问题,在传统偏度平衡方法的点云一次滤波算法的基础上,提出一种基于曲率统计的点云二次滤波方法。对该方法进行试验,并将试验结果与传统偏度平衡方法滤波结果进行对比分析。结果表明:基于曲率统计的点云二次滤波方法比传统偏度平衡法能够多滤除 83% 的植被点云、5% 的建筑物点云,能够有效地滤除传统偏度平衡方法滤波结果中的低矮植被、建筑物侧面墙脚等非地面点云。

关键词:激光雷达; 点云; 滤波方法; 曲率统计

中图分类号:P 237 **文献标志码**:A

A secondary filter method of LiDAR point cloud based on curvature statistics

WAN Jian-hua[1], HUANG Rong-gang[1], ZHOU Hang[2], ZENG Zhe[1]

(1. *School of Geosciences in China University of Petroleum*, *Qingdao* 266580, *China*;
2. *College of Geosciences in China University of Petroleum*, *Beijing* 102249, *China*)

Abstract: The rusults of conventional skewness balancing exist non-ground points of low vegetation and side of buildings. Aimed at this, a secondary filter method of LiDAR point cloud was developed based on curvature statistics to filter the remained non-ground points in the result of filter based on conventional skewness balancing. The results of the secondary filter method proposed and conventional skewness balancing were compared. The results show that the former can remove 83% more pionts of vegetation and 5% more pionts of building than the latter. The secondary filter method of LiDAR point cloud based on curvature statistics can efficiently filter the non-ground points remained in the conventional skewness balancing method.

Key words: LiDAR; point cloud; filter method; curvature statistics

机载激光雷达(LiDAR)点云滤波是获取高精度数字高程模型的关键问题。目前,已研究出了许多滤波算法,有数学形态学滤波方法[1-2]、基于坡度的滤波方法[3]、渐进三角网加密方法[4-5]、线性预测方法[6]等。但是,这些算法都需要根据经验进行阈值的设定,而自然世界的地形、地物变化复杂,难以确定合适的阈值。Bartels 等[7]提出了一种非监督、免阈值的滤波算法——偏度平衡方法(skewness balancing),Bartels[8]、Bao 等[9-10]对算法进行了改进,但该算法仍存在滤波结果中遗留有低矮植被、建筑物侧面墙脚等非地面点云的问题。为此,笔者在传统偏度平衡方法点云一次滤波的基础上,提出一种基于曲率统计的点云二次滤波方法,以滤除传统偏度平衡方法滤波结果中剩余的非地面点云。

1 滤波方法

对 LiDAR 点云滤波采用两次滤波处理,首先对点云进行传统偏度平衡方法点云一次滤波处理,然后对剩余点云进行基于曲率统计的点云二次滤波方法处理,减少非地面点云被误判为地面点云的错误,

收稿日期:2011-11-30

基金项目:中央高校基本科研业务费专项(10CX05007A)

作者简介:万剑华(1966-),男,教授,博士,主要从事数字油田、数字海洋等方面的研究工作。E-mail:wjh66310@163.com。

提高提取地形数据的精度,如图 1 所示。

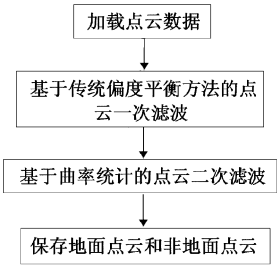


图 1　LiDAR 点云滤波方法流程

Fig. 1　Flow chart of LiDAR point cloud filter method

在现实中,LiDAR 点云一般都含有无法引起曲面局部突变的非地面点云区块,如建筑物顶面和侧面等。这部分点云的曲率信息与地面点云的曲率信息具有相似的特性,容易造成这部分点云的曲率信息与地面点云曲率信息混淆。如果直接采用基于曲率统计的点云二次滤波处理,容易出现大量非地面点云被误判为地面点云的情况。因此,需要先采用基于传统偏度平衡方法的点云一次滤波来滤除高程值较大且无法引起曲面局部突变的点云区块。

点云一次滤波处理后剩余的点云中存在遗留有低矮植被、建筑物侧面墙脚等非地面点云问题。综合分析后发现,滤波后剩余的点云数据具有以下特征:地面点云占主体且数量较大,而遗留的非地面点云只占少数;地面点云高程变化比较缓慢,表现为曲率较小,而非地面点云数量小、分布范围小,能够引起曲面的局部突变,导致非地面点云具有较大的曲率值。据此,根据中心极限定理可以假设:地面点云的曲率信息符合正态分布,非地面点的曲率看作是对地面点云曲率正态分布的一种扰动。因此,当 LiDAR 点云存在非地面点云时,其点云曲率信息的分布表现为右尾拉长现象(偏度值大于零),可以采用如图 2 所示方法从曲率方面来区分地面和非地面点云高程间的不同,以对非地面点云进行滤除。

(1)点云离散曲率计算。对剩余点云构建不规则三角网(TIN),计算点云的离散曲率。在基于曲率统计的点云二次滤波中,曲率一般选择最大主曲率较为合适。因为依附在地面的低矮非地面点云,都能引起局部曲面的尖锐突变,表现为曲率较大;而地形一般具有连续、平缓变化的特性,曲率相对于非地面点云较小。选用最大主曲率能够使得非地面点云曲率和地面点云曲率信息在频率分布图中的距离变大,有利于非地面点云的滤除。采用 Taubin 方法[11-12]进行离散主曲率估算。首先计算连续曲面上点的主曲率,然后对连续曲面公式进行离散化,使其适合三角网各顶点的最大主曲率、最小主曲率等的计算。

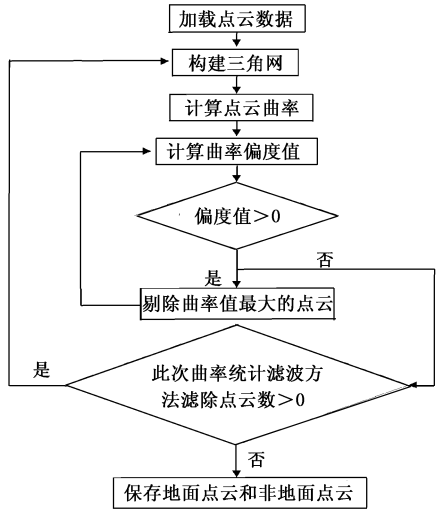


图 2　基于曲率统计的点云二次滤波流程

Fig. 2　Flow chart of the secondary filter method of LiDAR point cloud based on curvature statistics

设 T 为曲面上一点 p 处的某一单位切向量,$\boldsymbol{N}$ 为 p 处的法向量,$\boldsymbol{T}_1$、$\boldsymbol{T}_2$ 为顶点 p 处切平面内的主方向向量,则 $\boldsymbol{T}$ 可以表示为 $n\boldsymbol{N}+t_1\boldsymbol{T}_1+t_2\boldsymbol{T}_2$($n$、$t_1$、$t_2$ 为 $\boldsymbol{N}$、$\boldsymbol{T}_1$、$\boldsymbol{T}_2$ 的系数)。

p 点处沿 T 方向的法曲率 $k_p(\boldsymbol{T})$ 按下式计算:

$$k_p(\boldsymbol{T})=\begin{pmatrix}n\\t_1\\t_2\end{pmatrix}^{\mathrm{T}}\begin{pmatrix}0&0&0\\0&k_p^1&0\\0&0&k_p^2\end{pmatrix}\begin{pmatrix}n\\t_1\\t_2\end{pmatrix}. \tag{1}$$

式中,k_p^1、k_p^2 为曲面上 p 点的主曲率。

根据 Euler 公式,对沿 T 方向的法曲率进行变换表示:

$$k_p(\boldsymbol{T})=k_p^1\cos^2\theta+k_p^2\sin^2\theta. \tag{2}$$

式中,θ 为 $\boldsymbol{T}$ 与主方向 $\boldsymbol{T}_1$、$\boldsymbol{T}_2$ 的夹角,且 $-\pi\leqslant\theta\leqslant\pi$。

定义对称矩阵 $\boldsymbol{M}_p$:

$$\boldsymbol{M}_p=\begin{pmatrix}\boldsymbol{T}_1\\\boldsymbol{T}_2\end{pmatrix}^{\mathrm{T}}\times\begin{pmatrix}\frac{1}{2\pi}\int_{-\pi}^{\pi}k_p(\boldsymbol{T})\cos^2\theta\mathrm{d}\theta & \frac{1}{2\pi}\int_{-\pi}^{\pi}k_p(\boldsymbol{T})\cos\theta\sin\theta\mathrm{d}\theta\\ \frac{1}{2\pi}\int_{-\pi}^{\pi}k_p(\boldsymbol{T})\sin\theta\cos\theta\mathrm{d}\theta & \frac{1}{2\pi}\int_{-\pi}^{\pi}k_p(\boldsymbol{T})\sin^2\theta\mathrm{d}\theta\end{pmatrix}\begin{pmatrix}\boldsymbol{T}_1\\\boldsymbol{T}_2\end{pmatrix}. \tag{3}$$

$\boldsymbol{M}_p$ 可进一步简化为

$$\boldsymbol{M}_p=\begin{pmatrix}\boldsymbol{T}_1\\\boldsymbol{T}_2\end{pmatrix}^{\mathrm{T}}\begin{pmatrix}m_p^{11}&0\\0&m_p^{22}\end{pmatrix}\begin{pmatrix}\boldsymbol{T}_1\\\boldsymbol{T}_2\end{pmatrix}. \tag{4}$$

其中

$$m_p^{11} = \frac{1}{2\pi}\int_{-\pi}^{\pi} k_p(\boldsymbol{T})\cos^2\theta \mathrm{d}\theta = \frac{3}{8}k_p^1 + \frac{1}{8}k_p^2, \tag{5}$$

$$m_p^{22} = \frac{1}{2\pi}\int_{-\pi}^{\pi} k_p(\boldsymbol{T})\sin^2\theta \mathrm{d}\theta = \frac{1}{8}k_p^1 + \frac{3}{8}k_p^2. \tag{6}$$

根据式(5)、(6),可以得出主曲率是对称矩阵 $\boldsymbol{M}_p$ 非零特征值的函数:

$$k_p^1 = 3m_p^{11} - m_p^{22}, \tag{7}$$

$$k_p^2 = 3m_p^{22} - m_p^{11}. \tag{8}$$

对于 TIN 的主曲率估算,关键是对连续曲面主曲率计算过程中的 $\boldsymbol{M}_p$、法曲率、法向量等进行离散化。设 TIN 的某顶点为 v_i,顶点 v_i 对应的法向量为 $\boldsymbol{N}_{v_i}$,对应的 1 -环邻点集为 V。顶点 v_i 的 1 -环邻域(邻域内的三角形集记为 F)内某一三角形(f_k)的单位法向量为 $\boldsymbol{N}_{f_k}$,三角形(f_k)的面积为 $\boldsymbol{A}_{f_k}$。

v_i 处法向量 $\boldsymbol{N}_{v_i}$ 计算公式为

$$\boldsymbol{N}_{v_i} = \frac{\sum_{f_k\in F}\boldsymbol{A}_{f_k}\boldsymbol{N}_{f_k}}{\left\|\sum_{f_k\in F}\boldsymbol{A}_{f_k}\boldsymbol{N}_{f_k}\right\|}. \tag{9}$$

v_j 为 v_i 的 1 -环邻点,由 v_i 到 v_j 的向量记为 $\boldsymbol{V}_{ij}$。$\boldsymbol{V}_{ij}$ 在点 v_i 切平面上投影为 $\boldsymbol{T}_{ij}$,则沿 $\boldsymbol{T}_{ij}$ 方向的法曲率为

$$k_{ij} = \frac{2\langle \boldsymbol{N}_{v_i}, \boldsymbol{V}_{ij}\rangle}{\|\boldsymbol{V}_{ij}\|^2}. \tag{10}$$

顶点 v_i 的 $\boldsymbol{M}_{v_i}$ 估算,实际上就是对 $\boldsymbol{M}_p$ 进行离散化,表示为

$$\boldsymbol{M}_{v_i} = \sum_{v_j\in V}\omega_{ij}k_{ij}\boldsymbol{T}_{ij}\boldsymbol{T}_{ij}^{\mathrm{T}}. \tag{11}$$

$$\boldsymbol{T}_{ij} = \frac{(\boldsymbol{E} - \boldsymbol{N}_{v_i}\boldsymbol{N}_{v_i}^{\mathrm{T}})\boldsymbol{V}_{ij}}{\|(\boldsymbol{E} - \boldsymbol{N}_{v_i}\boldsymbol{N}_{v_i}^{\mathrm{T}})\boldsymbol{V}_{ij}\|}. \tag{12}$$

其中,ω_{ij} 为面积加权;$\boldsymbol{E}$ 为单位权矩阵。计算 $\boldsymbol{M}_{v_i}$ 的特征向量和特征值,然后根据式(7)和(8)计算出顶点 v_i 的主曲率 $k_{v_i}^1$、$k_{v_i}^2$。

高斯曲率(K_{Gauss})和平均曲率(K_{Mean})的计算公式为

$$K_{\mathrm{Gauss}} = k_{v_i}^1 k_{v_i}^2, \tag{13}$$

$$K_{\mathrm{Mean}} = \frac{k_{v_i}^1 + k_{v_i}^2}{2}. \tag{14}$$

(2)点云二次滤波处理。以曲率信息作为研究对象,进行基于曲率统计的点云二次滤波处理。利用下式计算点云曲率信息分布的偏度值:

$$S = \frac{1}{n\sigma^3}\sum_{i=1}^{n}(X_i - \mu)^3. \tag{15}$$

式中,S 为所剩点云曲率信息分布的偏度值;n 为所剩点云 X_i 的总数量;σ 为所剩点云 X_i 曲率的标准方差;μ 为所剩点云 X_i 曲率的算术平均值。

如果偏度值为 0,则滤波处理结束;如果偏度值大于 0,表明所剩点云中存在非地面点,则将曲率信息最大的点滤除,再次计算剩余点云曲率的偏度值。按这种方式循环剔除点云中的非地面点云。

基于曲率统计的点云二次滤波方法是一个循环滤波的过程(图 2)。由于使用基于曲率统计的点云二次滤波处理后,点云重构三角网的离散点曲率发生了变化,导致三角网重构后的曲率信息不再服从正态分布。因此,需要对点云进行循环滤波,直到基于曲率统计的 LiDAR 点云二次滤波滤除的点云数为零为止。

2　试验结果分析

2.1　试验数据

试验区域选择某城市正在开发的居民区及其周边(区域 A),该区域地形具有小幅度的起伏,其点云如图 3 所示。区域 A 主要分为两部分:R1 和 R2,其中 R1 为居民区,R2 为开阔地。区域 A 点云数据有 22 133 个数据点,水平范围为 566.29 m×309.3 m,高程范围为-2.15 ~ 75.86 m,平均点云分辨率为 0.13 个/m^2。非地面点云主要有 R1 内的建筑物,V1、V2、V3 等处的低矮植被,并已知 A 区域的点云分类参考数据,地面点云有 18 300 个点,植被有 1 268 个点,建筑物有 2 565 个点。图 3 中灰色表示地面点云,黑色表示非地面点云。

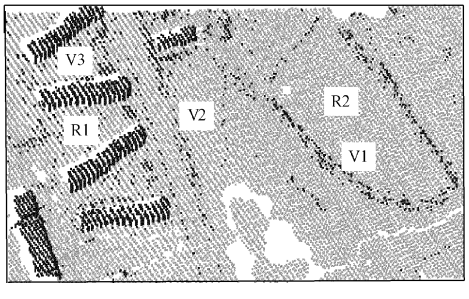


图 3　区域 A 点云分类参考数据

Fig. 3　Reference data of classification of LiDAR point cloud in region A

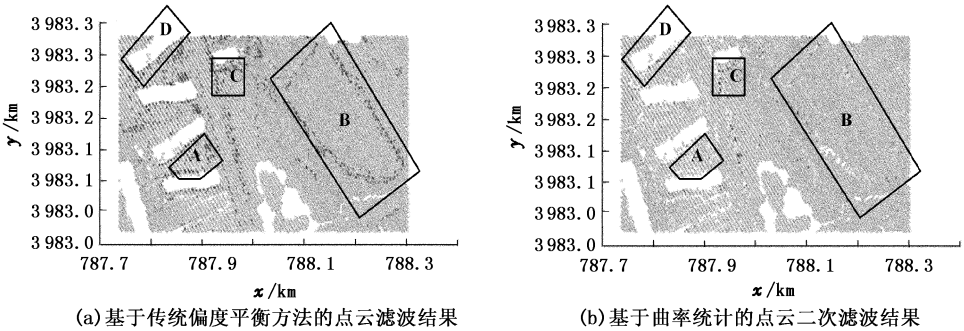
2.2　试验过程及其结果分析

试验主要是在对点云数据进行基于传统偏度平衡方法的点云一次滤波后,进行基于曲率统计的点云二次滤波。

首先对区域 A 点云数据进行基于传统偏度平衡方法的点云一次滤波处理,滤波结果如图 4(a)所

示,灰色点云为地面点云、黑色点云为非地面点云。由于区域 A 地形略有起伏,出现地面点云高于某些非地面点云的情况,导致部分非地面点云混淆于地面点云高程分布中。并且该部分点云占据了较大比例,成为地面点云高程正态分布中必不可少的一部分。因此,滤波结果中存在低矮植被以及建筑物侧面墙脚等非地面点云被误判为地面点的情况。部分被误判的非地面点云如图 4(a)中 A、B、C、D 等处黑色点云所示,其中 D 处为建筑物侧面墙脚点云,其余 3 处为低矮植被点云。

经过基于传统偏度平衡方法的点云一次滤波处理后,对剩余点云的曲率进行综合分析发现:地面点云的曲率信息占主体,遗留的非地面点云占少数;遗留的非地面点都能引起拟合曲面(试验采用不规则三角网 TIN)局部突变,导致局部曲率值突变。这些特征保证了地面点云曲率符合正态分布,非地面点云曲率是对其正态分布的一种扰动,并且非地面点云曲率值偏大,使得曲率分布呈右尾拉长状。因此,可以采用基于曲率统计的点云二次滤波进行处理。在曲率的选择上,经过对地面点云和非地面点云曲率特性的分析,以及多组滤波试验结果分析,发现基于最大主曲率统计的点云二次滤波对点云的滤波效果最好,而基于平均曲率、高斯曲率和最小曲率统计的点云二次滤波方法对点云基本没有滤波效果,所以在试验中选择最大主曲率来进行基于曲率统计的点云二次滤波,滤波结果如图 4(b)所示,结果中剩余较少的非地面点云。



(a)基于传统偏度平衡方法的点云滤波结果　　(b)基于曲率统计的点云二次滤波结果

图 4　基于传统偏度平衡方法的点云滤波与基于曲率统计的点云二次滤波结果对比

Fig. 4　Result comparison of conventional skewness balancing and the secondary filter method of LiDAR point cloud based on curvature statistics

由图 4 可以发现:图 4(a)中 A、B 两处植被点云,在基于曲率统计的点云二次滤波后基本被滤除;图 4(a)中 C 处的点云是分布在道路旁边的密集且高度大致的人造植被,导致部分点云曲率值较小,从而在基于曲率统计的二次滤波后还有部分植被点云被保留;图 4(a)中 D 处的建筑物侧面墙脚点云,在基于曲率统计的二次滤波后基本被滤除,只剩余零星的建筑物侧面墙脚点云。由此,基于曲率统计的点云二次滤波能够有效的滤除基于传统偏度平衡方法滤波结果中的大部分低矮植被、建筑物侧面墙脚等非地面点云。

将基于传统偏度平衡方法的点云滤波结果、基于曲率统计的点云二次滤波结果与区域 A 的分类参考数据进行定量统计分析,统计结果如表 1、图 5 所示。其中图 5 中柱状之上的百分率为非地面点云与参考点云中相应非地面点云数量的比值。表 1 和图 5 都反映了各类别点云数量随点云滤波处理的变化。

结合表 1 和图 5,对试验结果数据进行定量分析,可以得出:

(1)基于传统偏度平衡方法的点云滤波结果中植被点云剩余 1 196 个点,占原始植被点云的 94.3%,建筑物点云剩余 163 个点,占原始建筑物点云的 6.355%,表明算法在建筑物点云滤波方面具有较好效果,在植被点云滤波方面效果非常差;而基于曲率统计的点云二次滤波,滤除的植被点云占原始植被点云的 89.117%、建筑物点云占原始建筑物点云的 98.752%,较传统偏度平衡法对植被点云的滤除效果提高了 83%,对建筑物点云的滤波效果提高了 5%。因此,基于曲率统计的二次滤波方法较传统偏度平衡法更有效地克服了其对植被滤波效果不好的缺点,有效地提高了滤波结果的精度,减少了自动滤波后人工编辑工作量。

(2)基于曲率统计的点云二次滤波后仍存在少量的非地面点云。其原因是:区域 A 地形略有起伏,导致少量非地面点云与部分地面点云的曲率信息出现混淆,使得部分非地面点云曲率无法扰动地面点云曲率的正态分布。因此,基于曲率统计的点云二次滤波方法目前仅适用于较平坦区域。

综上,基于曲率统计的点云二次滤波,在较平坦区域对基于传统偏度平衡方法点云滤波结果中的低矮植被、建筑物侧面墙脚等非地面点云的滤除是有效的。

表 1 各类别点云数量统计

Table 1 Quantity statistics of LiDAR point cloud for each class

点云所处阶段	地面点云/个	建筑物点云/个	植被点云/个
参考点云阶段	18 300	2 565	1 268
基于传统偏度平衡方法的点云滤波阶段	18 105	163	1 196
基于曲率统计的点云二次滤波阶段	17 351	32	138

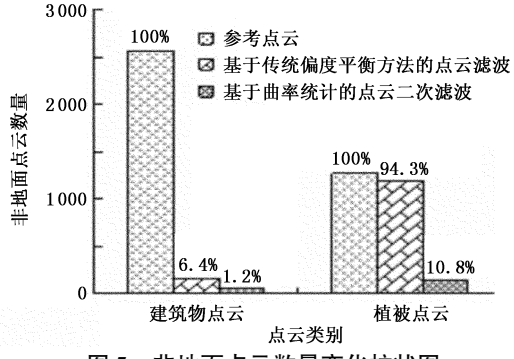


图 5 非地面点云数量变化柱状图

Fig. 5 Bar chart of quantity change in non-ground points

3 结束语

针对传统偏度平衡方法在地形略有起伏的情况下滤波结果中遗留有低矮植被、建筑物侧面墙脚等非地面点云问题,发展了一种基于曲率统计的点云二次滤波对传统偏度平衡方法滤波结果进行二次滤波处理,提高了点云自动滤波的正确率。通过对地形略有起伏的某居民区 LiDAR 点云进行滤波处理试验,并与传统偏度平衡方法滤波试验结果对比分析,发现基于曲率统计的点云二次滤波方法能够有效地滤除较平坦地区的 LiDAR 点云经过传统偏度平衡方法滤波处理后遗留的大部分非地面点云。基于曲率统计的点云二次滤波采用的曲率为最大主曲率,对某些地形突变细节特征具有腐蚀影响,而采用其他曲率信息,则滤波结果中仍过多地保留非地面点云。

参考文献:

[1] LINDENBERGER J. Laser-profilmenssungen zur Topographischen Gelandeaufnahme [D]. Stuttgart: Universitat Stuttgart, 1993.

[2] KILIAN J, HAALA N, ENGLICH M. Capture and evaluation of airborne laser data[J]. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, 1996,31(3):383-388.

[3] VOSSELMAN G. Slope based filtering of laser altimetry data[J]. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, 2000,33:958-964.

[4] AXELSSON P. DEM generation from laser scanner data using adaptive TIN models [J]. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing,2000,33:85-92.

[5] 赵影. 基于机载 LIDAR 数据的城市建筑物提取研究[D]. 长春:吉林大学计算机科学与技术学院,2011.
ZHAO Ying. Extraction study of urban buildings based on airborne LIDAR data[D]. Changchun: College of Computer Science and Technology in Jilin University,2011.

[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] BARTELS M, HONG W. Segmentation of LIDAR data using measures of distribution [J]. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2006,36(7):426-31.

[8] BARTELS M, HONG W. Threshold-free object and ground point separation in LIDAR data [J]. Pattern Recognition Letters, 2010,31:1089-1099.

[9] BAO Yun-fei, CAO Chun-xiang, CHANG Chao-yi, et al. Segmentation to the point clouds of LIDAR data based on change of kurtosis[C]//International Symposium on Photoelectronic Detection and Imaging Technology and Application (ISPDI) 2007, Beijing, China, 2007. Bellingham, USA: SPIE, c2008.

[10] BAO Yun-fei, LI Guo-ping, CAO Chun-xiang, et al. Classification of LIDAR point cloud and generation of DTM from LIDAR height and intensity data in forested area[J]. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2008,37(B3b):313-318.

[11] TAUBIN G. A signal processing approach to fair surface design[C]//Proceeding of the 22nd annual conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, 1995. New York, USA:ACM, 1995:351-358.

[12] 齐宝明. 三角网格离散曲率估计和 Taubin 方法改进[D]. 大连:大连理工大学数学科学学院,2008.
QI Bao-ming. Curvatures estimation and the improvement of Taubin's method on triangular mesh[D]. Dalian: School of Mathmatical Sciences in Dalian University of Technology, 2008.

(编辑 修荣荣)