

文章编号: 1001-3806(2011)04-0527-04

城区机载 LIDAR 数据滤波方法研究

唐菲菲^{1,2}, 阮志敏³, 刘星^{1,2}

(1. 重庆大学 土木工程学院, 重庆 400044; 2. 重庆大学 山地城镇建设与新技术教育部重点实验室, 重庆 400045; 3. 招商局重庆交通科研设计院有限公司, 重庆 400067)

摘要: 为了从机载激光扫描数据中获取城区数字地面模型, 在分析城区机载激光扫描数据多回波信息特点的基础上, 提出一种基于多回波信息的城区数据滤波方法, 该方法根据城区机载激光扫描数据的分布特点, 将激光脚点划分到具有一定体积的体素中, 然后依据滤波准则, 剔除地物点, 保留地面点, 最后得到城区数字地面模型。结果表明, 该方法较以往滤波方法不仅能有效提取数字地面模型, 而且可以减少机载激光扫描数据处理的计算量, 提高海量机载激光扫描数据的运算效率。

关键词: 激光技术; 城区数字地面模型; 滤波; 机载激光扫描; 多回波

中图分类号: P237 **文献标识码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1001-3806.2011.04.021

Research of filtering method for urban airborne LIDAR data

TANG Fei-fei^{1,2}, RUAN Zhi-min³, LIU Xing^{1,2}

(1. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 2. Key Laboratory of New Technology for Construction of Cities in Mountain Area of Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400045, China; 3. China Merchants Chongqing Communications Research & Design Institute Co. Ltd., Chongqing 400067, China)

Abstract: To extract urban digital terrain model (DTM) from airborne laser scanning data, a filtering algorithm was proposed after analyzing the multi-pulse characteristics of urban airborne light detection and ranging (LIDAR) data. In this method, according to the distribution characteristics of urban airborne LIDAR data, laser footprints were distributed into voxels with proper volume, then object points were excluded and terrain points were reserved on the basis of filtering rules. Finally, the experiment result shows that this method can extract DTM more effectively. Meanwhile, the calculation amount is reduced during data processing which is helpful for improving computation efficiency of the mass LIDAR data.

Key words: laser technique; urban digital terrain model; filtering; light detection and ranging; multi-pulses

引言

数字地面模型(digital terrain model, DTM)是城市规划建设的基础地理数据之一, 机载激光扫描(light detection and ranging, LIDAR)技术能够直接获取大范围、高精度的3维空间信息, 通过数据滤波从机载 LIDAR 数据中提取 DTM 是目前研究的热点。现有滤波方法可被分为3类: 基于面的滤波方法, 如移动曲面拟合滤波^[1], 利用不规则三角网逐渐逼近真实地表等^[2], 基于有限元思想分等级稠化不规则三角网(triangular irregular network, TIN)^[3]; 基于块信息最小的滤波方法^[4], 渐进式数学形态学运算的方法^[5]; 基于坡度的滤波方法^[4,6-7]。上述方法多是单纯利用激光

脚点之间的高程突变特点进行滤波, 而机载 LIDAR 数据中的多回波信息直接反应了目标的垂直结构特征, 如果能够充分利用这一信息, 则可以对数据滤波起到有益的辅助作用。本文中以城区机载 LIDAR 数据为分析对象, 总结 LIDAR 数据多回波信息的特点, 提出一种基于多回波信息的数据滤波方法。

1 城区机载 LIDAR 数据回波组成

城区机载 LIDAR 数据中的激光脚点主要由地面点、人工建筑物点和植被点组成, 多次回波现象多发生在植被和建筑物边缘处。通过对实测数据的分析, 城区的回波分布见图1, 单次回波主要来源于人工建筑物的顶面或墙面、地表和少量植被点, 其滤波关键为地面点和人工建筑物点的分离; 首次回波来源于植被的冠层和建筑物的边缘, 基本不包含地表, 故首次回波可以不参加滤波; 而未次回波则主要来源于地表, 可能有少部分是来源于植被低矮层面的枝叶, 只要剔除这部分植被点便可以得到地表。因此, 对于城区来说, 生成

作者简介: 唐菲菲(1980-), 女, 博士, 现主要从事机载激光雷达数据后处理技术的研究。

E-mail: fftang80@126.com

收稿日期: 2010-10-18; 收到修改稿日期: 2011-01-12

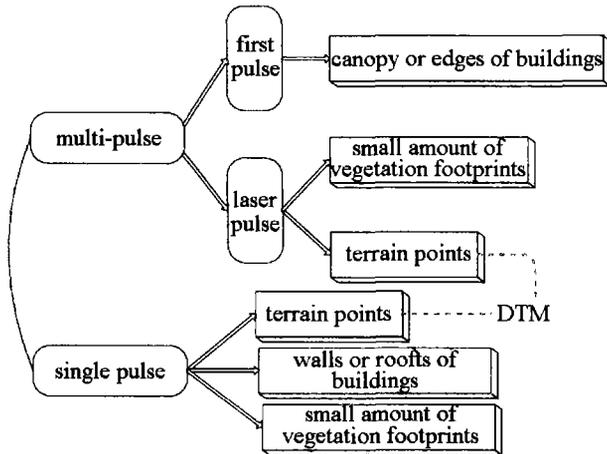


Fig. 1 Multi-pulse component of urban airborne LIDAR data

DTM 的地面激光脚点应该主要从单次回波和末次回波中获取。

2 城区机载 LIDAR 数据滤波

本文中城区机载 LIDAR 数据滤波利用了基于体素的滤波方法,该方法被成功应用于提取森林地区 DTM^[8],结合城区的回波特点和建筑物激光脚点的分布特征,对该方法中的滤波准则做出相应调整,同样适用于城区 DTM 的获取。鉴于以上对城区机载 LIDAR 多回波信息的分析,首先从单次回波中剔除建筑物点,然后把单次回波中得到的地面点并入末次回波中剔除植被点,即得到地面点集合。数据滤波流程见图 2。

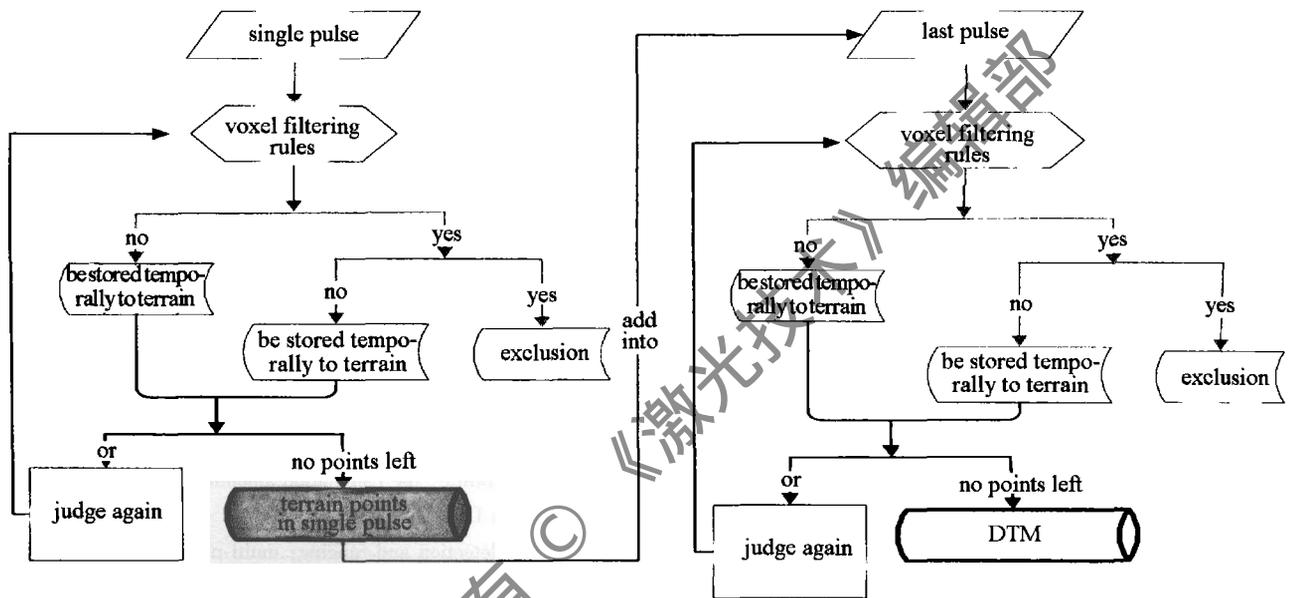


Fig. 2 Flow chart for urban airborne LIDAR data filtering

体素即体积元素,是 3 维空间中的基本单位。基于体素的数据滤波思想,是将机载 LIDAR 数据划分到具有一定体积大小的体素中(体素的体积大小依据激光脚点的密度来确定),然后计算各体素的高程均值,接着设定某一体素为中心体素,将中心体素的高程均值与领域体素的高程均值进行比较,根据一定的滤波准则判断中心体素中的激光脚点是地物点还是地面点^[8]。该滤波准则的确定建立在对于激光脚点的分布特征分析的基础上。

人工建筑物和植被的激光脚分别具有不同的分布特征。建筑物的激光脚点的分布有一定的规律性,根据建筑物顶部构造不同,一般是均匀分布在同一层面或某几个层面上,如果不考虑墙面上的激光脚点,建筑物顶面的激光脚点与其周围的地面点在垂直方向上沿建筑物顶面边缘发生高程突变,即使是处于地形起伏较大区域的建筑物,其顶面高程值

也至少在某一个方向上大于周围的地面点(见图 3);而植被的激光脚点则一般呈现为不规则离散分布(见图 4)。因此,城区数据滤波准则与森林地区的滤波准则有所不同。



Fig. 3 Laser footprints distribution of buildings



Fig. 4 Laser footprints distribution of vegetations

对城区 LIDAR 的滤波,首先将激光脚点划分到具有一定体积的相应体素中,体素的滤波思想和体素大小的确定参见笔者在林区机载 LIDAR 数据滤波的方

法一文^[8],然后以体素为单位,根据上述对城区 LIDAR 的分布特点的分析,确定适合于城区数据滤波的滤波准则。

城区 LIDAR 数据滤波准则如下:(1)首先比较中心体素与邻域体素的高程均值,如果中心体素的高程均值小于邻域中所有体素的高程均值,则认为该中心体素中不含有建筑物点,将体素中的激光脚点保存到该中心体素的临时地面点集 E_{temp} ;否则,如果中心体素的高程均值大于邻域中某一体素的高程均值,则认为该体素中可能含有建筑物点,将该体素中的激光脚点放入待剔除的地物点集合 O_{temp} ;(2)将该体素中的激光脚点的最低点与邻域中各体素的激光脚点的最低点进行比较,如果其最低点的高程值大于邻域中所有体素的最低点,那么确定该体素中的所有激光脚点均为地物点,将该体素中的激光脚点放入地物点集合 O_i ;否则,如果其最低点的高程值小于邻域中某一体素的最低点,那么找出所有体素(包括中心体素和邻域体素)的最低点高程的最大值 $Z_{min,max}$,设定高差阈值 $T_{\Delta Z}$,保留该体素内高程值小于 $(Z_{min,max} + T_{\Delta Z})$ 的激光脚点到临时地面点集合 E_{temp} ,高程值大于 $(Z_{min,max} + T_{\Delta Z})$ 的激光脚点认为地物点,被剔除掉,放入地物点集合 O_i ;(3)当所以体素被处理完后,每个体素保留下来的地面点集合 E_{temp} 的并集组成临时地面点集合 E_p ,作为下一级体素滤波的初始点集。

以上滤波准则,可以用下面两个表达式表示,滤波得到的地面点集合见(1)式,地物点集合见(2)式:

$$E_p = \bigcup_{i=1}^j E_{temp,i} = \bigcup_{i=1}^j \left\{ \begin{aligned} & \{ E_{(p-1),i} \in E_{(p-1)} \mid Z_q \in E_{(p-1),i} \}, \\ & [Z_{ave,i} < \min(Z_{ave,n,k})] \text{ or } \\ & [((Z_{ave,i} > Z_{ave,n,m}) \text{ but } (Z_{min,i} < Z_{min,n,m})) \\ & \text{ and } (Z_q \leq \max(Z_{ave,n,k}) + T_{\Delta Z})] \end{aligned} \right. \quad (1)$$

式中, E_p 为第 p 次迭代得到的激光脚点集合, $E_{(p-1)}$ 为第 $p-1$ 次体素滤波得到的激光脚点集合, $E_{(p-1),i}$ 为根据 $E_{(p-1)}$ 中的激光脚点重新进行体素划分后第 i 个体素的激光脚点集合, Z_q 是该集合中的第 q 个激光脚点的高程, E_{temp} 和 $Z_{ave,i}$ 分别是第 i 个中心体素的地面点集合和高程均值, $Z_{ave,m}$ 为邻域中某一体素的高程均值, $Z_{ave,n,k}$ 是任一邻域体素的高程均值 ($k=1,2,\dots,8$), $Z_{min,i}$ 和 $Z_{min,n,m}$ 分别为中心体素和邻域中某一体素的最低点高程值, $T_{\Delta Z}$ 为容许浮动范围内的高差阈值,一般为 0.5m 或 1m。

$$O_p = \bigcup_{i=1}^j O_i =$$

$$\bigcup_{i=1}^j \left\{ \begin{aligned} & \{ E_{(p-1),i} \in E_{(p-1)} \mid Z_q \in E_{(p-1),i} \}, \\ & [(Z_{ave,i} > \forall Z_{ave,n,k}) \\ & \text{ and } (Z_{min,i} > \max(Z_{min,n,k}))] \text{ or } \\ & [((Z_{ave,i} > \forall Z_{ave,n,k}) \text{ but } (Z_{min,i} < Z_{min,n,m})) \\ & \text{ and } (Z_q > \max(Z_{min,n,k}) + T_{\Delta Z})] \end{aligned} \right. \quad (2)$$

式中, O_p 为第 p 次迭代得到的地物点集合, O_i 为第 i 个体素中的地物点集合。

3 实验分析

选取国际摄影测量协会 ISPRS 提供的德国某城区的机载 LIDAR 数据作为实验数据,其激光脚点间距为 1m。对该数据应用本文中方法,滤波结果见图 5 和表 1。图 5a 为原始数据浮雕图,图 5b 为参考数据,其参

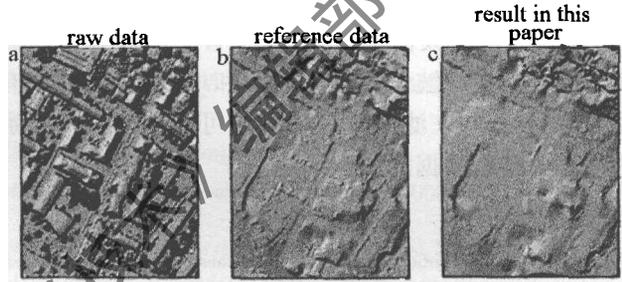


Fig. 5 Filtering results comparison

Table 1 Statistical results of filtering errors

method	type I	type II
filtering method in this paper	5.45%	1.4%
TIN filtering	8.87%	7.78%
TIN filtering based on maximum distance	4.89%	1.48%
hierarchical robust interpolation	7.29%	1.52%

考数据是利用 TERRASOLID 软件进行半自动化滤波后得到的 DTM,图 5c 为利用本文中的方法滤波得到的 DTM。根据 SITHOLE 和 VOSSelman 提出滤波算法质量的定量评定方法^[9],滤波质量的好坏由一类误差即 type I 和二类误差即 type II 来反映,type I 表示地面点的误差,即地面点被错误的分类为地物点而被剔除,type II 则表示错将地物点当做地面点保留下来产生的滤波误差,type I 和 type II 的值越小说明滤波算法的效果越好。利用作者滤波方法得到的一类误差为 5.45%,二类误差为 1.4%。对于同一块实验数据,分别应用目前被认为滤波质量较高的 3 种方法,予以比较后发现,本文中的方法在滤波质量优于以上 3 种方法的平均水平。

从减少计算量的角度,应用以往方法进行滤波时,全部激光脚点均参与计算,而应用本文中的方法,只有单次回波和末次回波参与计算,经过统计发现,参与计算的激光脚点数量减少了 29%。对于密度不断增大,数据采集量日益增大的海量激光点云数据来说,在不

影响滤波质量的前提下,减少数据运算量也是作者方法优于以往方法的地方。

4 结束语

对城区机载 LIDAR 数据的多回波信息进行了分析,并根据城区建筑物激光脚点的分布特征,利用体素思想对城区机载 LIDAR 数据进行滤波,提取城区 DTM。该方法利用多回波信息辅助数据滤波,不仅使滤波质量得到了提高,而且在一定程度上减少了计算量。

该方法中对于机载 LIDAR 点云数据多回波信息的利用还有待改进。目前的研究大多仅用到了首次回波和末次回波,随着硬件技术的发展,多次回波探测能力逐渐增强,现在一般的机载 LIDAR 系统都能探测到 5 次左右的多回波信息,作为除了首次回波和末次回波外的中间次回波信息处于地表和地物表面之间,有其独特的含义,在滤波处理中应该可以作为一个特别的参考面辅助数据滤波。

参考文献

- [1] ZHANG X H. Airborne laser scanning altimetry data filtering and features extraction[D]. Wuhan: Wuhan University, 2002:169 (in Chinese).
- [2] 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.
- [3] KRZYSZEK P. Filtering of laser scanning data in forest areas using finite elements[EB/OL](2003-10-10)[2010-02-03]. http://www.isprs.org/commission3/wg3/workshop_laserscanning/papers/Krzyszek_ALSDD2003.pdf.
- [4] CHEN Q, GONG P, BALDOCCHI D, et al. Filtering airborne laser scanning data with morphological methods[J]. Photogrammetry Engineering & Remote Sensing, 2007, 73(2): 175-185.
- [5] SITHOLE G, VOSSLEMAN G. Filtering of airborne laser scanner data based on segmented point cloud[C]//Archives of International Society of Photogrammetry and Remote Sensing. Dresden, Germany: Institute of Photogrammetry and Remote Sensing, Dresden University of Technology, 2005, 36: 66-71.
- [6] MENG X L. A slope- and elevation-based filter to remove non-ground measurements from airborne LIDAR data[C]//Archives of International Society of Photogrammetry and Remote Sensing. Dresden, Germany: Institute of Photogrammetry and Remote Sensing, Dresden University of Technology, 2005, 36: 23-28.
- [7] SHAN J, SAMPATH A. Urban DEM generation from raw LIDAR data: a labeling algorithm and its performance[J]. Photogrammetry Engineering & Remote Sensing, 2005, 71(2): 217-226.
- [8] TANG F F, LIU J N, ZHANG X H, et al. A voxel-based filtering algorithm for DTM data extraction in forest areas[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2009, 31(1): 55-59 (in Chinese).
- [9] SITHOLE G, VOSSLEMAN G. ISPRS comparison of filtering algorithms[R]. Delft, Netherlands: International Society of Photogrammetry and Remote Sensing, 2003: 29.
- [15] COHEN O, CARMON T, SEGEV M, et al. Holographic solitons[J]. Optics Letters, 2002, 27(22): 2031-2033.
- [16] LIU J S. Holographic solitons in photorefractive dissipative systems[J]. Optics Letters, 2003, 28(22): 2237-2239.
- [17] LIU J S. Existence and stability of rigid photovoltaic solitons in an open-circuit amplifying or absorbing photovoltaic medium[J]. Physical Review, 2003, E68(2): 026607.
- [18] LIU J S. Existence and property of spatial solitons in a photorefractive dissipative system[J]. Journal of the Optical Society of America, 2003, B20(8): 1732-1738.
- [19] LIU J S, DU Z M. Dynamical evolution of rigid holographic bright solitons based on photorefractive two-wave mixing with moving grating[J]. Acta Physica Sinica, 2005, 54(6): 2739-2744 (in Chinese).
- [20] LIU J S, ZHANG G Y, LIU S X, et al. Study of temperature characteristic of rigid holographic bright solitons based on photorefractive two-wave mixing[J]. Acta Physica Sinica, 2007, 56(6): 3266-3271 (in Chinese).
- [21] KOSTRITSKII S M, MARING D B, TAVLYKAEV R F, et al. Self-generated two-photon photorefractive effect induced by light upconversion in Er-doped LiTaO₃[J]. Applied Optics, 2000, 39(24): 4292-4295.
- [22] CASTRO-CAMUS E, MAGANA L F. Prediction of the physical response for the two-photon photorefractive effect[J]. Optics Letters, 2003, 28(13): 1129-1131.
- [23] HOU Ch F, PEI Y B, ZHOU Z X, et al. Spatial solitons in two-photon photorefractive media[J]. Physical Review, 2005, A71(5): 053817.
- [24] HOU Ch F, ZHANG Y, JIANG Y Y, et al. Photovoltaic solitons in two-photon photorefractive materials under open-circuit conditions[J]. Optics Communications, 2007, 273(2): 544-548.
- [25] ZHANG Y, HOU Ch F, SUN X D. Grey photovoltaic solitons in two-photon photorefractive materials under open-circuit case[J]. Journal of Optics, 2008, A10(2): 025101.
- [26] YEH P. Two-wave mixing in nonlinear media[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1989, 25(3): 484-519.
- [27] AKHMEDIEV N N, AFANASJEV V V, SOTO-CRESPO J M. Singularities and special soliton solutions of the cubic-quintic complex Ginzburg-Landau equation[J]. Physical Review, 1996, E53(1): 1190-1201.
- [28] SOTO-CRESPO J M, AKHMEDIEV N N, AFANASJEV V V. Stability of the pulselike solutions of the quintic complex Ginzburg-Landau equation[J]. Journal of the Optical Society of America, 1996, B13(7): 1439-1449.

(上接第 526 页)