

文章编号:1001-9081(2008)05-1214-03

基于机载激光雷达点云的断裂线自动提取方法

徐景中, 万幼川, 张圣望

(武汉大学 遥感信息工程学院, 武汉 430079)

(Jz_xu02@yahoo.com.cn)

摘要:基于机载激光雷达(LIDAR)点云生产高精度的数字高程模型(DTM)需要进行断裂线的存储与表达,在分析现有断裂线提取方法不足的基础上,提出一种从 LIDAR 点云自动提取断裂线的方法。该方法利用离散的点云构建三角网,建立点云之间的拓扑关系,根据三角网面片之间的法向差异提取候选断裂线点,采用“方向优先”追踪策略实现断裂线的追踪处理,并利用“线性迭代法”实现断裂线的光滑输出。实验结果表明,该方法可以快速从 LIDAR 点云中自动提取断裂线信息,具有一定的应用价值。

关键词:机载激光雷达;点云;数字地面模型;断裂线

中图分类号: TP79; TP391.41 **文献标志码:** A

Automatic breakline extraction from LIDAR point clouds

XU Jing-zhong, WAN You-chuan, ZHANG Sheng-wang

(School of Remote Sensing Information Engineering, Wuhan University, Wuhan Hubei 430079, China)

Abstract: For producing high quality Digital Terrain Model (DTM) based on Light Detection And Ranging (LIDAR) point clouds, breaklines must be explicitly stored and represented within the data structure. Having analyzed traditional methods' deficiencies in breakline extraction, the paper proposed an automatic extraction method. To accomplish breakline extraction, the method processed LIDAR point clouds in three steps. The first step, a mesh surface was reconstructed to establish explicit topological relation among the discrete points; the second, normal-based edge detection was applied on the irregular mesh to extract sharp borders with curvature discontinuity; finally, breaklines were traced with "direction priority" strategy and smoothed by "iterative interpolation" algorithm. The result shows that it is robust and has potential application in topographic analysis and mapping.

Key words: Light Detection And Ranging(LIDAR); point clouds; Digital Terrain Model (DTM); breakline

0 引言

机载激光雷达技术(Light Detection And Ranging, LIDAR)是近数十年来摄影测量与遥感领域具有革命性的成就之一。该系统集激光扫描系统、全球定位系统和惯性导航系统于一体,根据系统发射、接收激光脉冲的时间延迟,以及系统的位置和姿态等信息来获取地面目标的三维点云信息。由于采集数据的高效性、主动性以及受气候影响小等因素, LIDAR 技术已成为获取数字地面模型(Digital Terrain Model, DTM)的主要方式之一^[1,2]。由于断裂线的手工提取效率低下,精度易受作业人员熟练程度的影响,基于 LIDAR 点云获取 DTM 的研究较少考虑断裂线信息,这在一定程度上降低了 DTM 的精度。对于高精度的 DTM 的生产,在 DTM 的数据结构中显式地存储和表达断裂线信息很有必要^[3]。

目前,关于从 LIDAR 点云中自动或半自动提取断裂线的研究较少。文献[4,5]利用 LIDAR 点云按高程值重采样为距离图像,接着利用图像处理的方法计算像素的二阶导数来获取断裂线的候选点,并进一步拟合成断裂线。这种方法虽然比较便捷,但由于经过图像重采样,断裂线的提取结果与实际的断裂线存在位置偏差。文献[6]通过局部平面拟合相交的方法来提取断裂线,该方法直接对离散 LIDAR 点云处理,较

好地保持了断裂线的精度,但需要人工给出断裂线的起始位置和方向作为断裂线生长的初始值,缺乏自适应性,而且该方法需要面片拟合相交逐步得出断裂线,时间代价较大。因此,本文提出一种基于区域法向差异提取断裂线的方法,该方法不需要人工干预,直接基于离散的 LIDAR 点云进行处理。

1 算法描述

区域法向量的获取方法主要包含两种:1)利用局部区域内的有效点进行局部曲面拟合,而后根据曲面方程可求得该区域任意点的法向量;2)根据三角形剖分原理,对局部区域进行剖分,便可获得每个三角形的外法向量,进一步可以得到局部区域的法向量。不同的法向量获取方法对应不同的处理效率。由于三角网能较好地适应不规则形状区域,克服规则网格对起伏程度变化大的区域描述不够精细的缺点,本文通过构建三角网的方法来获取区域的法向量,并以三角形面片的法向量差异作为断裂线的探测标准。

1.1 断裂线的探测

1.1.1 法向量计算

将离散的 LIDAR 点云按照 Delaunay 规则构建二维不规则三角网模型^[7],利用三角网顶点的三维坐标计算每个三角网面片的法向量(垂直于三角面的向量),如图 1 所示。

收稿日期:2007-11-06;修回日期:2007-12-26。

基金项目:国家 863 计划项目(SQ2006AA12Z108506;2006AA12Z136);国家测绘局 2006 年基础测绘项目(1469990624201)。

作者简介:徐景中(1980-),男,江苏淮安人,博士研究生,主要研究方向:LIDAR 数据的处理及应用; 万幼川(1960-),男,浙江淳安人,教授,博士生导师,主要研究方向:遥感影像处理、数字流域、机载激光雷达; 张圣望(1979-),男,山东泰安人,博士研究生,主要研究方向:LIDAR 数据的处理及应用。

面片法向求解过程如下:

$$\vec{n} = \vec{n}_1 \times \vec{n}_2 = \begin{bmatrix} i & j & k \\ x_2 - x_1 & y_2 - y_1 & z_2 - z_1 \\ x_3 - x_1 & y_3 - y_1 & z_3 - z_1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\vec{n}_1 = (x_2 - x_1)i + (y_2 - y_1)j + (z_2 - z_1)k \quad (2)$$

$$\vec{n}_2 = (x_3 - x_1)i + (y_3 - y_1)j + (z_3 - z_1)k \quad (3)$$

其中: $(x_1, y_1, z_1), (x_2, y_2, z_2), (x_3, y_3, z_3)$ 分别为点 P_1, P_2, P_3 的三维坐标, \vec{n}_1, \vec{n}_2 分别为三角形两条边的向量, \vec{n} 为所求的法向量。

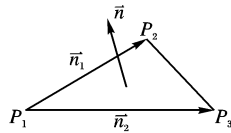


图1 三角形面片的法向量

通常情况下,地形曲面是连续变化的;而在断裂线附近地形起伏变得不连续,即断裂线附近点的高程会存在明显的差异。对于面片法向量来说,位于断裂线两侧的面片之间会存在明显的法向量差异,即法向量之间具有明显的夹角。

1.1.2 断裂点的探测

由于点云已通过三角网的方式构建了邻域拓扑关系,因此,探测断裂线点的过程就是遍历三角面片的过程。即从任意一个三角面片开始,若该三角形与其邻域三角形的法向量存在明显差异,则将该三角形与邻域三角形的公共边标记为候选的断裂线。三角形邻域分析如图2所示,对于三角形 T_1 ,若邻域三角形 T_2 的法向量与 T_1 的法向量存在差异,则标记边 P_1P_3 为候选的断裂线段。

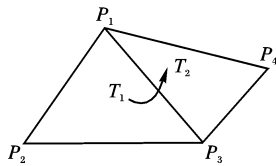


图2 三角形邻域分析

由于实际地形并非为理想的光滑状态,因此,直接基于三角网面片的法向差异探测突变边缘,对噪声很敏感。为了有效探测面片之间的差异,削弱噪声对断裂线探测的影响,此处利用三角形面片法向量计算各面片的坡度,并对坡度差异不大的面片进行合并处理。合并准则为:对于某一三角网面片,若其相邻面片的坡度与当前坡度的差异小于设定的阈值,则将该面片与邻域面片合并到同一坡度区间中。

1.2 断裂线的追踪

由于LIDAR点云分布的不规则特征,以及地形曲面的非理想的平滑,通过以上方法探测到的断裂线候选点中,不仅包含真正的断裂线点,也包含许多伪断裂点,而且这些候选断裂线点并不刚好位于断裂线上,因此,需要在断裂线提取的同时去除伪断裂点。由于测区中含有多条断裂线,断裂线的提取不能简单地通过拟合方法来确定。因此,本文采用一种邻域方向优先的搜索方法进行断裂线分组及追踪。首先,基于候选断裂线段,构建点的最近邻域;然后,基于点的最近邻域关系检索出断裂线的端点,并根据端点追踪出所有断裂线。

断裂线追踪的具体流程如下:

1) 基于候选断裂线段的顶点与边的关系,构建候选断裂点的邻域关系。由于伪边缘的存在,断裂点与其邻域断裂点的关系包含三种情形:只有一个邻域点(1:1)、含有两个邻域点(1:2)以及含有多个邻域点(1:多)。

2) 根据断裂点的邻域关系,搜索断裂线的起始端点。由

于断裂线起始点通常只含有一个邻域突变点的点,因此,只需搜索邻域关系为(1:1)的点作为断裂线起始点即可。

3) 根据断裂线起点进行断裂线的追踪。追踪过程如下:对于当前断裂点,若其邻域只有一个候选断裂点,且该点已被处理,则标记当前断裂线追踪完毕;若邻域含有两个候选断裂点,则选择没有被处理的点作为该线的下一断裂点,继续追踪;若邻域含有多个候选断裂点,则采用“方向优先”追踪策略选择下一断裂点进行追踪。

方向优先追踪策略如图3所示, P_1, P_2 为已追踪到的断裂线点,追踪方向为 $\vec{P_1P_2}$ 。对于当前点 P_2 ,其邻域未处理的候选点包含 P_3, P_4, P_5, P_6 ,则下一断裂点的选择方法为:计算每个候选点 P_3, P_4, P_5, P_6 与追踪方向 $\vec{P_1P_2}$ 的夹角,分别为 $\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4$;然后,选择最小角对应的候选点作为下一断裂点,继续追踪。图中最小角为 β_3 ,对应的下一个断裂点为 P_5 。追踪过程迭代进行,直至处理完所有的断裂点迭代结束。

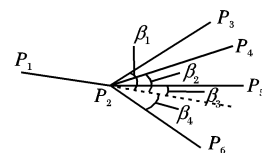


图3 方向优先追踪策略

由于伪边缘的存在,在断裂线追踪完毕,本文以断裂线点的个数作为阈值,删除点数小于阈值的伪断裂线。

1.3 断裂线的平滑

由于LIDAR点云采集的随机性,通过上述处理得到的断裂线并不严格位于真实的断裂线处,提取的断裂点通常位于实际断裂线的两侧,呈现“Z”字型。因此,有必要对上述断裂线进行平滑处理。对于断裂线的平滑处理,本文采用线性迭代光滑法^[8],该方法建立在线性插值的基础上,通过简单的迭代处理,不断抹去转折点达到最终的曲线光滑。线性迭代光滑原理如图4所示,设平面上的一组数据点为 A, B, C, \dots, N , 取其中的三点 A, B, C , 在 AB 两点之间1/2处定出点 A' , 在 BC 点之间1/2处定出点 B' , 则 $A'B'B'$ 三点之间为有效的插值区间。

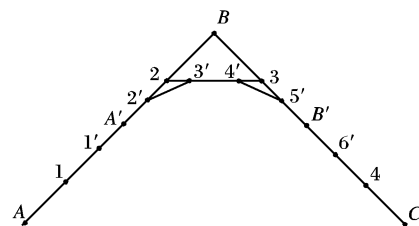


图4 线性迭代光滑原理

第一次插值算出 AB 和 BC 间的1/4处的点位,其序号为1,2,3,4,连接23,就抹去了 B 点。

第二次插值是在12,23,34区间进行,同样算出个区间的1/4处的点位,其序号为1',2',...,6',连接2'3'和4'5',就抹去了2,3两点。

这样迭代处理,可以得到光滑的曲线。迭代次数与所得插值点数的关系式为: $M = 2^N + 2$ 。迭代次数可以按照原始数据点列的距离和夹角大小而定。

2 实验与讨论

为验证本文算法的有效性,利用VC++实现了该算法,并对某段道路的LIDAR点云进行断裂线的提取实验,点云的平均密度为1.8点/ m^2 ,点云渲染如图5所示。

利用离散点云进行不规则三角网 (Triangulated Irregular Network, TIN) 的构网处理, 并计算三角形面片的坡度, 然后按面片坡度差异进行突变边缘的探测, 突变边缘的探测结果如图 6 所示。从图中可以看出, 探测结果不仅包含真实断裂线, 也包含许多伪边缘线。

基于突变边缘进一步依据方向优先的策略进行追踪, 删除点数小于阈值的伪断裂线 (阈值设为 10) 后得到的断裂线呈“Z”字形, 需要进行平滑处理。利用线性迭代光滑法进行光滑处理后 (光滑次数设定为 2 次), 断裂线叠加 DTM 的效果如图 7 所示, 可以看出提取的断裂线与实际地形吻合很好。为了进一步对比断裂线的提取效果, 本文将离散点云按高程值重采样为灰度图像 (采样间隔为 0.5 m), 并利用矢量化软件进行断裂线的手工提取, 断裂线手工提取结果如图 8 所示。对比图 7、8 不难发现, 断裂线自动提取的结果与手工提取的结果基本一致, 而且采用本文算法提取的断裂线对地形局部的反映更细致。

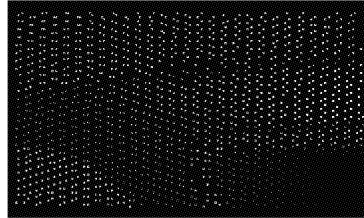


图 5 点云渲染图

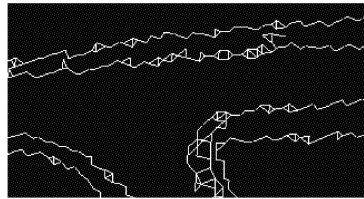


图 6 突变边缘的探测结果

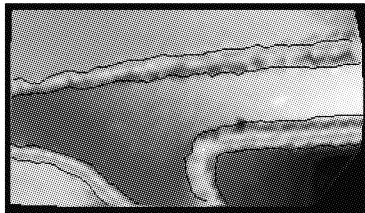


图 7 断裂线叠加 DTM 显示



图 8 断裂线手工提取结果

实验结果表明, 本方法可以从离散的 LIDAR 点云中自动探测断裂线, 不需要人工干预, 并且断裂线精度较高。

3 结语

数字地面模型的生产一直是测绘及地理信息系统领域的主要工作内容之一, LIDAR 技术使得高精度的 DTM 的快速生产成为可能。但目前, 基于 LIDAR 点云生成 DTM 的生产中并无显式的存储断裂线信息。为实现断裂线的自动提取, 提高 DTM 的生产质量, 本文提出一种基于区域法向差异提取断裂线的方法, 该方法能快速从离散的 LIDAR 点云中提取断裂线, 不需要人工干预。不过, 本文方法提取的断裂线的精度受点云密度影响较大, 随着点云密度的降低, 断裂线的精度随之降低。因此, 若想提取精度较高的断裂线, LIDAR 点云的密度要满足一定的要求。

参考文献:

- [1] AXELSSON P. Processing of laser scanner data-algorithms and applications[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 1999, 54(2/3): 138-147.
- [2] XU JING-ZHONG, WAN YOU-CHUAN, ZHANG XU-BING. A method of edge detection based on improved canny algorithm for the LIDAR depth image[C]// Proceedings of SPIE-Geoinformatics 2006 on Remotely Sensed Data and Information. Bellingham, USA: [s. n.], 2006: 185-203.
- [3] BRIESE C. Breakline modelling from airborne laser scanner data [D]. Vienna, German: Vienna University of Technology, 2004.
- [4] BRÜGELMANN, R. Automatic breakline detection from airborne laser range data[J]. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, 2000, 33(B3/1): 109-115.
- [5] SUI LI-CHUN. Processing of laser scanner data and extraction of structure lines using methods of the image processing[J]. 测绘学报, 2004, 33(1): 63-70.
- [6] BRIESE C. Three-dimensional modelling of breaklines from airborne laser scanner data[J]. International Archives of Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2004, 35(3): 1097-1102.
- [7] AXELSSON P. DEM generation from laser scanner data using adaptive tin models[J]. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2000, 33(1): 110-117.
- [8] 闫浩文, 褚衍东, 杨树文, 等. 计算机地图制图原理与算法基础[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [9] DONOHO D L. De-noising by soft-thresholding[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1995, 41(3): 613-627.
- [10] DONOHO D L, DUNCAN M R. Digital curvelet transform: strategy, implementation and experiments[C]// Proceedings of SPIE Aerosense 2000. Bellingham: SPIE, 2000, 4056: 12-30.
- [11] CANDES E J, DEMANET L, DONOHO D L, et al. Fast discrete curvelet transform[EB/OL]. [2007-09-25]. <http://www.curvelet.org>.
- [12] STARCK J-L, CANDES E J, DONOHO D L. The curvelet transform for image denoising[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2002, 11(6): 670-684.
- [13] HYVARINEN A. Fast and robust fixed-point algorithms for independent component analysis[J]. IEEE Transactions on Neural Networks, 1999, 10(3): 626-634.
- [14] HYVARINEN A. Fast ICA for noisy data using Gaussian moments [C]// Proceedings of the 1999 IEEE International Symposium on Circuits and Systems(ISCAS'99). Washington, DC: IEEE Computer Society, 1999: 57-61.
- [15] PARASEHIV-IONESCU A, JUTTEN C, AMINIAN K, et al. Source separation in strong noisy mixtures: A study of wavelet de-noising pre-processing[C]// Proceedings of the 2002 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP'02). Washington, DC: IEEE Computer Society, 2002: 1681-1684.
- [16] XIANG QIAN, LING CHUN-SHENG, CHENG JIN-FANG. Adaptive algorithm for blind source separation from instantaneous noisy mixtures[J]. Data Acquisition and Processing, 2006, 21(1): 42-45.

(上接第 1210 页)