

车载激光扫描数据中高速公路路面点滤波

刘如飞¹ 田茂义¹ 许君一¹

¹ 山东科技大学测绘科学与工程学院, 山东 青岛, 266590

摘要:提出了一种从车载激光扫描数据中自动提取路面的方法。通过分析车载激光扫描点云的空间特征, 提出运用近似平面约束法、有序最小二乘坡度估计法和多尺度窗口迭代分析法进行初始路面种子点提取; 然后基于局部坡度滤波方法提取所有的路面点; 最后选择两组实际点云数据进行实验。结果表明, 该方法能快速准确地提取高速公路路面点云, 实验数据的提取准确率为 95.74%, 完整率为 98.11%。

关键词:车载激光扫描; 路面点滤波; 平面约束; 窗口迭代分析

中图法分类号: P237.3

文献标志码: A

在高速公路测量中, 车载激光扫描作为一种先进的测量手段^[1], 在不与测量物接触、不影响交通的情况下, 能够采集大面积高精度、高密度的路面、交通设施、植被等公路及附属设施的表面信息。通过采集的点云数据可以获取高精度的路面地形, 为道路改扩建、路面沉降和破损分析等应用提供基础数据, 而这些深入应用的前提是如何快速精确地从激光点云数据中提取出路面点云^[2]。

目前, 已有不少国内外学者对激光点云数据的地面滤波方法进行了研究。在机载方面, Axelsson^[3]提出了 TIN 三角网加密方法处理机载点云数据。算法首先选择局部区域内的最低点作为种子点来构建初始稀疏三角网, 然后通过迭代对 TIN 三角网进行加密, 从而实现滤波; Vosselman^[4]提出了一种基于坡度变化的滤波算法, 其核心思想为: 当局部范围内的任意点与待判点的坡度大于给定的坡度阈值时, 待判点即为非地面点, 算法的关键在于选择合适的坡度阈值; Zhang 等^[5]描述了一种渐进式形态学滤波算法来过滤地物点, 即在运用数学形态学方法时, 依据地形坡度和窗口尺寸计算相应的高差阈值。在车载方面, Sherif^[6]提出基于点云空间特征向量进行聚类分析, 通过计算法线方向和特征值进行人行道、路面、路缘石等分类; Anttoni^[7]利用强度与高程图像自动分类道路标示和路缘石点云, 并通过

Delaunay 三角网构建道路表面; Yang Bisheng^[8]提出一种通过逐条扫描线的处理从车载激光点云中提取路面和路缘石点云的方法, 主要考虑道路路坎的形状, 在扫描线上设置滤波窗口的高差。

目前, 车载道路点云数据处理中, 研究对象一般为城市规则道路, 通常包含明显的路缘石, 缺少针对高速公路(无路缘石)路面提取的研究, 由于城区道路与高速公路的差异, 相关算法(如基于扫描线的方法)并不能适应高速公路的点云特征; 同时一些算法过多地依赖先验条件, 增加处理难度。虽然在机载点云数据处理中地面点云滤波研究较多, 但由于两者点云的扫描距离、目标、点密度及精度不同, 所以不能直接沿用机载的方法。本文针对高速公路原始点云数据, 提出了一种路面初始种子点的提取方法, 然后基于坡度滤波思想, 通过局部格网邻域坡度对比分析提取全部路面点。

1 高速公路路面点滤波算法

车载激光扫描系统可以获取高速公路路面及两侧地物点云, 路面滤波的目的在于去除路面的车辆、交通设施、植被及两侧地物等, 只保留所有路面点云。滤波算法流程图如图 1 所示。

1.1 路面种子点约束提取

高速公路路面坡度较小, 点云分布平滑。对

收稿日期: 2013-08-30

项目来源: 现代城市测绘国家测绘地理信息局重点实验室开放课题资助项目(20111204W); 国家科技支撑计划资助项目(2012BAB16B01); 海洋公益性行业科研专项经费资助项目(201305034-1); 山东科技大学研究生创新基金资助项目(YC130103)。

第一作者: 刘如飞, 博士生, 研究方向为车载激光扫描数据处理、航摄图像处理、3S 技术集成与应用。E-mail: liurufei_2007@126.com

通讯作者: 田茂义, 博士, 副教授。E-mail: tianmaoyi_zhy@126.com

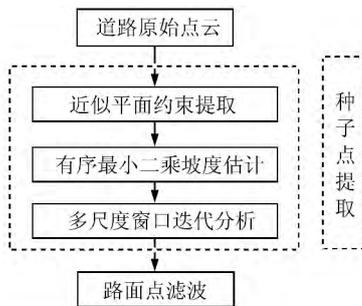


图1 滤波算法流程图

Fig.1 Flow Chart of Filtering Algorithm

路面进行三维格网化处理,传统方法通常是将每个格网中高程最低点作为该格网的初始地面种子点。为提高初始地面种子点的提取概率,本文提出了近似平面约束法,算法原理如下:假定单个格网内部存在路面点,那么在格网内应存在一个平滑的地表平面,则至少需要三个非共线地面点。近似平面约束模型如图2所示,首先将单个格网分割成大小相等的四个子格网,获取每个子格网的最低点,然后从中随机抽取三个点。三点空间关系满足如下条件:①三点构成的三角形的边长大于距离阈值(1/2格网步长);②任意两点坡度小于区域路面最大坡度阈值;③三点构成的三角形尽可能接近正三角形。当格网内不存在符合条件的三个点时,则去除格网;若符合条件,则选择其中最低点作为疑似路面点种子点。

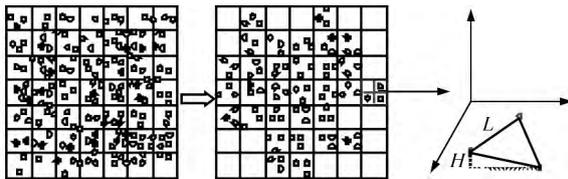


图2 平面约束种子点(虚拟格网俯视图)

Fig.2 Seed Point by Plane Constraint

1.2 种子点迭代分析去噪

车载移动测量系统沿着道路采集数据,由于道路两侧地物多样,当扫描到表面近似水平且面积较大的平整地物时,如低矮、整齐的植被表面,格网最低点会被错误判读为路面种子点。针对此问题,本文首先利用有序最小二乘估计窗口坡度阈值,然后运用多尺度窗口迭代方法对格网种子点进行多次迭代过滤,进一步去除种子点中的噪声点。迭代过程如下。

1) 窗口坡度阈值估计。在近似平面约束处理之后,从目标格网一定尺度窗口的格网中提取每个格网的最低点,然后通过最小二乘拟合局部空间平面,以平面的坡度作为局部近似坡度阈

值^[9]。由于初始种子点可能存在粗差点,因此采用一种有序最小二乘法拟合平面,流程如下:①将窗口格网中的种子点按照高程进行排序,取小于中值的点拟合平面,设局部区域的空间平面方程如式(1)所示,利用最小二乘法计算 a 、 b 、 c 的初始值,然后计算平面坡度 s 。

$$z = ax + by + c \quad (1)$$

②利用式(2),按排序顺序计算大于中值的种子点到拟合平面的距离 d ,将距离 d 与阈值 σ 进行比较,小于阈值,则加入点集,再次拟合平面,获取平面参数估计值;大于阈值,则去除该点及以后的所有点。

$$d_i = \frac{|ax_i + by_i - z_i + c|}{\sqrt{a^2 + b^2 + 1}} \quad (2)$$

$$\sigma_i = s_i \times l_i \quad (3)$$

式(2)和式(3)中, d_i 为点到平面的距离; s_i 为坡度; l_i 为邻域窗口的对角线长。③利用所有保留下来的点重新计算参数 a 、 b 、 c ,即可获得最佳平面参数,以最终平面的坡度作为局部近似坡度阈值。

2) 格网种子点判定。对于未知格网 A ,由路面点云的连续性可以认为路面上 8 邻域窗口的格网数不小于 3 个,否则为孤立地物,需去除;若不是孤立点,由格网 A 的最低点和 8 邻域格网中的最低点构成以 A 为顶点的扇形三角网,如图 3 所示,约束三角形边长大于 1/2 格网步长,且为锐角三角形,计算每一个三角面相对于水平面的坡度^[3,4,10],同时比较三角面三个顶点的高程关系,然后取坡度排序后的中值与窗口坡度估计阈值进行比较,若大于阈值,且 A 点高程较高,则认为 A 格网内的所有点为非路面点,需去除,被去除的格网不再参与下一步滤波。

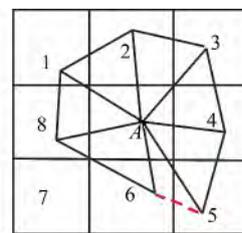


图3 扇形三角坡度估计

Fig.3 Slope Estimation of Fanning Triangle

3) 多尺度窗口迭代分析。如果 A 格网及 8 邻域窗口格网的最低点均为非路面点,且高程相近,如图 4 所示, A 格网及周围灰色区域高程均为 3 m,通过 8 邻域大小的窗口进行一次分析只能去除 A 格网及周围部分高程为 3 m 的种子点,无法去除所有非路面种子点,需要进行多尺度迭代

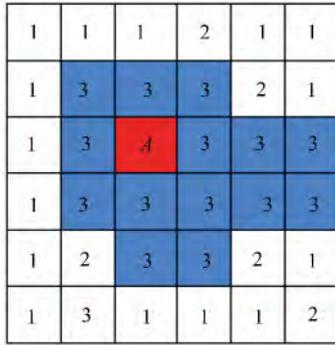


图 4 非地面平整区域示意图

Fig. 4 Diagram of Non-Ground Level Area

滤波。其流程如下:首先利用相同尺度窗口对上一次邻域分析的结果进行迭代处理,直到前后两次保留的格网数之差在阈值范围内;然后扩大迭代分析的窗口,按照上述步骤再进行相同处理,通过多尺度窗口迭代逐层将道路非路面格网种子点和空间孤立的格网点去除,尺度最大窗口小于区域内最大的非路面平整区域,由于车载系统沿道路采集,窗口大小由道路两侧低矮、平滑的植被的表面大小决定,一般区域宽度小于 10 m。

1.3 格网内路面点提取

获取路面格网种子点之后,根据路面点云的连续性,本文将局部坡度滤波的范围控制在 2 m 内,根据格网步长转换为实际窗口邻域大小。以 8 邻域窗口为例,即由格网内的待定点与 8 邻域格网中的路面种子点参照上文格网种子点判定方法构成扇形三角网,计算三角面的坡度,取待定点为最高点的三角面中的最大坡度值与 8 邻域的坡度估计阈值进行比较,在阈值范围内的为路面点。

2 实验分析

本文利用 C++ 实现了上述算法,采用山东科技大学和青岛秀山移动测量公司研发的 Vsurs I 型车载式三维空间移动测量系统采集的点云数据。选择两处比较典型的高速公路路段,实验区域点云类型包括道路、交通附属设施、植被和汽车,两段高速公路长度约为 150 m,路面点位精度在 5 cm 左右,路面点云平均距离小于 0.1 m,点云平均密度大于 100 点/m²,其中直道点云总数为 836 501 个,平均点距为 0.08 m,路面的坡度小于 4.5%,边坡坡度大于 65%,点云最大高差为 8.01 m;弯道点云总数为 687 823 个,平均点距为 0.07 m,路面的坡度小于 5%,边坡坡度大于 65%,点云最大高差为 7.38 m。

在建立三维格网时,为了保留路面细节,格网不宜设置较大,但格网较小会显著降低处理效率。本文建立了三维格网步长与坡度、局部路面高差的关系为:

$$\text{slope} = \frac{\Delta h}{\sqrt{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2}} \quad (4)$$

其中,slope 为坡度; Δh 为局部路面高程差值(局部范围小于单车道宽度); Δx 和 Δy 分别是 x 、 y 方向的步长。

实验路段路面最大坡度为 5%,局部(2 m 范围)路面点最大高差为 0.1 m,根据式(4)计算格网的对角线距离为 $\sqrt{2}$ m,确定方形格网步长为 1 m \times 1 m;根据垂直距离对点云进行分层,依据格网索引只对最下面一层进行处理,提高效率,本文根据点云最大高差,同时保证路面点均位于最下一层格网中,设置垂直步长为 2 m。

表 1 为路面提取算法运行结果的统计数据,可以看出,格网内近似平面约束法和多尺度窗口分析法能有效提高地面初始种子点的概率,同时大大减少了所需处理的格网数,提高了运算效率。以直道为例,均匀格网处理后,有 7 223 个格网需要进一步处理,近似平面约束使格网数降低为 5 613,窗口迭代分析使格网数进一步降低为 5 074,两步运算共去除了直道 2 149 个非路面格网种子点。

表 1 路面点云处理结果统计
Tab. 1 Road Surface Point Cloud Processing Results

实验 路段	平面约束 格网数		窗口迭代分 析格网数		地面点 数/个	时间/s
	均匀 格网	平面 约束	迭代 数	处理 后		
直道	7 223	5 613	2	5 074	608 893	18
弯道	4 932	2 926	3	1 543	438 654	15

弯道路面运用本文的算法去除非路面种子点的前后对比如图 5 所示。可以看出,在原始数据中,道路两侧存在大量非地面点,经过两步处理被成功去除;两段道路的路面滤波三维视图结果(路面为真彩点云)如图 6 和图 7 所示。可以看出,两侧与中间植被、交通设施等非路面点被准确地滤除,路面点云完整,行车道边缘的少部分平坦的路肩地面被提取出来,不影响后期应用;图 7 中弯道路面中间有护栏遮挡,由于采集系统在左侧行驶,右侧路面点云比较稀疏,在滤波时进行格网点密度约束,经过滤波只保留车载系统行驶一侧的高密度路面点云。

借鉴车载 LiDAR 数据滤波评价的误差指标^[10],将误差 error(I)定义为路面点误分为非路

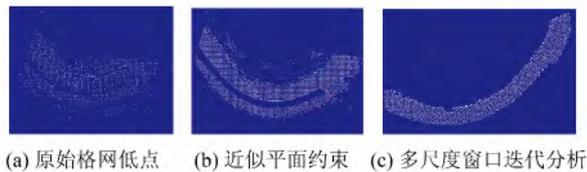


图5 路面初始种子点提取过程

Fig. 5 Extraction Process of Road Surface Seed Points



图6 直道路面滤波结果

Fig. 6 Filtering Results of Straight Road

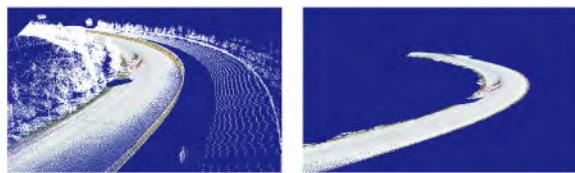


图7 弯道路面滤波结果

Fig. 7 Filtering Results of Curve Road

面点的误差,则:

$$\text{error(I)} = [n/(m+n)] \times 100\% \quad (5)$$

其中, m 表示路面点分类正确的点数; n 表示路面点分类成非路面点的点数。

误差 error(II) 定义为非路面点误分为路面点的误差,则:

$$\text{error(II)} = [k/(k+l)] \times 100\% \quad (6)$$

其中, k 表示非路面点分类成路面点的点数; l 表示非路面点分类正确的点数。

为综合评估算法提取路面的可行性,本文对路面提取的准确率和完整率两项指标进行评估,路面准确率(pavement accuracy rate, PAR)定义为正确提取路面点面积与自动提取全部路面点面积的比值;路面完整率(pavement integrity rate, PIR)定义为正确提取路面面积与实际道路路面面积的比值。

$$\text{PAR} = [\eta/(\eta+\mu)] \times 100\% \quad (7)$$

$$\text{PIR} = (\eta/\beta) \times 100\% \quad (8)$$

其中, η 表示提取正确路面点的面积; μ 表示提取非路面点的面积; β 表示实际路面面积。

按上述误差计算方法,采用人工提取的方法从直道数据中提取出误差统计值 m 、 n 、 k 、 l 和评估统计值 η 、 μ 、 β , 其中实际道路路面面积 β 为 4 704.63 m²。表 2 列出了本文算法与其他几种滤波算法(扫描线法^[2]、数学形态^[5]、斜率法^[9])的对比,其中第 II 类误差要小于以上三种方法,第 I 类误差稍微偏大,但是为了保持较高的数据精度,实验中主要需要控制第 II 类误差;本文算法提取路面的准确率为 95.74%, 优于其他方法,完整率为 98.11%, 缺失区域主要为车辆遮挡,可见,本文提取的路面点云误差较小,准确率高。

表2 几种滤波算法对比

Tab. 2 Comparison of Several Filtering Algorithm

算法	参数				误差/%		PAR/%	PIR/%		
	m /个	n /个	k /个	l /个	η /m ²	μ /m ²				
数学形态	614 436	13 932	5 235	115 626	4 652.56	653.24	2.21	4.33	87.69	98.89
斜率法	615 387	12 981	7 632	113 229	4 666.32	853.23	2.06	6.31	84.54	99.19
扫描线法	605 315	23 053	1 789	119 072	4 531.63	242.56	3.66	1.48	94.92	96.32
本文方法	608 256	20 112	1 311	119 550	4 615.51	205.45	2.80	1.08	95.74	98.11

3 结 语

车载激光扫描系统能快速获取高速公路路面点云数据,本文通过对高速公路点云数据的空间分布特征进行了分析,充分考虑路面点云平滑、连续分布的特点,运用近似平面约束法和窗口迭代分析有效提取了初始路面种子点;在估计局部坡度时,提出了有序最小二乘拟合法。算法结合了数据统计特性,通过中值提取增强了滤波的稳健性。实验结果和误差分析证明,本文提出的路面

点滤波方法的适应性强,稳定性高,能有效提取高速公路路面高密度点云,通过对直道结果进行分析,得出 I 类与 II 类误差分别为 2.8%、1.08%;准确率和完整率分别达到 95.74%、98.11%。另外,本文算法需要一些人工经验作为阈值参数(如迭代次数控制阈值),自适应性有待进一步研究。下一步将利用真彩信息进行少量路肩去除。

参 考 文 献

- [1] Shi Wenzhong, Li Bijun, Li Qingquan. A Method for Segmentation of Range Image Captured by Vehicle-borne Laserscanning Based on the Density of

- Projected Points [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2005, 34(2): 95-100(史文中, 李必军, 李清泉. 基于投影点密度的车载激光扫描距离图像分割方法[J]. *测绘学报*, 2005, 34(2): 95-100)
- [2] Li Yongqiang, Sheng Yehua, Liu Huiyun, et al. 3D Road Information Extraction Based on Vehicle-borne Laser Scanning[J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2008, 33(4): 23-25(李永强, 盛业华, 刘会云, 等. 基于车载激光扫描的公路三维信息提取[J]. *测绘科学*, 2008, 33(4): 23-25)
- [3] Axelsson P. DEM Generation from Laser Scanner Data Using Adaptive TIN Models[C]. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Annapolis, USA, 2000
- [4] Vosselman G. Slope Based Filtering of Laser Altimetry Data[C]. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Amsterdam, USA, 1999
- [5] Zhang K Q, Chen S C, Whitman D. A Progressive Morphological Filter for Removing Non-ground Measurements from Airborne LiDAR Data [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2003, 41(4): 872-882
- [6] Halawany S E L, Moussa A, Lichti D D. Detection of Road Curb from Mobile Terrestrial Laser Scanner Point Cloud[C]. 2011 ISPRS Calgary 2011 Workshop, Calgary, Canada, 2011
- [7] Antoni J, Hyypä A J, Hyypä A H. Retrieval Algorithms for Road Surface Modelling Using Laser-based Mobile Mapping [J]. *Sensors*, 2008, 8: 5 238-5 249
- [8] Yang B S, Fang L N, Li J. Semi-automated Extraction and Delineation of 3D Roads of Street Scene from Mobile Laser Scanning Point Clouds[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2013, 79: 80-93
- [9] 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): 26-28(曾齐红, 毛建华, 李先华, 等. 激光雷达点云平面拟合过滤算法[J]. *武汉大学学报·信息科学版*, 2008, 33(1): 26-28)
- [10] Sithole G. Filtering of Laser Altimetry Data Using a Slope Adaptive Filter[J]. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2001, 34(3/W4): 203-210

Expressway Road Surface Point Filtering for Mobile Laser Scanning Data

LIU Rufe¹ TIAN Maoyi¹ XU Junyi¹

¹ College of Geomatics, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China

Abstract: An automatic extraction method of expressway road surface from mobile laser scanning (MLS) data is presented. Through an analysis of the spatial characteristics of expressway MLS point cloud data, an approximate plane constraint (APC) method, an ordering least square method of slope estimation and multi-scale window iterative analysis (MWIA) method were developed to extract initial ground seed points on the grid, and then all road surface points are extracted from the original points based on local slope. Finally, two groups of actual point cloud data were selected for an experiment, the results show that the proposed method can quickly and accurately extract a road surface from MLS data. The correctness of our road extraction results was 95.74% and completeness was 98.11%.

Key words: mobile laser scanning; road surface point filtering; plane constraint; multi-scale window iterative analysis

First author: LIU Rufe, PhD candidate, specializes in mobile laser scanning data processing, aerial image processing and integration of 3S technology and application. E-mail: liurufe_2007@126.com

Corresponding author: TIAN Maoyi, PhD, associate professor. E-mail: tianmaoyi_zhy@126.com

Foundation support: The Key Laboratory for Urban Geomatics of National Administration of Surveying, Mapping and Geoinformation, No. 20111204W; the National Key Technology Research and Development Program of the Ministry of Science and Technology of China, No. 2012BAB16B01; the Marine Research Special Funds for Public Welfare Projects, No. 201305034-1; Graduate Innovation Fund Project of Shandong University of Science and Technology, No. YC130103.