

基于多光谱数据指导的偏度平衡点云滤波

韩晓峰¹, 杨风暴¹, 卫红², 李大威¹, 刘丹¹

¹中北大学信息与通信工程学院, 山西 太原 030051;

²英国雷丁大学系统工程学院, 伯克郡 雷丁 RG6 6AU

摘要 针对现有激光雷达(LiDAR)点云滤波方法无法有效排除数字表面模型(DSM)中数据空洞干扰的问题,提出了基于多光谱数据指导的偏度平衡点云滤波方法。该方法将多光谱数据引入点云滤波并将其作为引导图像,实现了与噪声点光谱相似点的快速去噪。实验结果表明,该方法有效排除了数据空洞对点云滤波造成的干扰,所得到的滤波误差与原有偏度平衡点云滤波方法相比减少了0.4%~0.8%;与目前流行的基于支持向量机(SVM)的滤波算法相比,该方法的误差减少了0.1%~0.4%。

关键词 遥感; 点云滤波; 偏度平衡; 激光雷达

中图分类号 TN911.73

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.042801

Point Cloud Filter of Skewness Balance Based on the Guidance of Multispectral Data

Han Xiaofeng¹, Yang Fengbao¹, Wei Hong², Li Dawei¹, Liu Dan¹

¹School of Information and Communication Engineering, North University of China, Taiyuan, Shanxi 030051, China;

²School of Systems Engineering, University of Reading, Reading, Berkshire RG6 6AU, UK

Abstract Aiming at the problem that the existing light detection and ranging (LiDAR) point cloud filtering method cannot effectively exclude the data hole interference in the digital surface model (DSM), a skewness balance point cloud filtering method based on multispectral data guidance is proposed. This method introduces the multispectral data into the point cloud filter as the guiding image to realize the fast denoising with the spectral similarity of the noise points. The experimental results show that this method can effectively eliminate the interference caused by the data hole to the point cloud filtering, and the obtained filtering error is reduced by 0.4%-0.8% compared with the original skewness point cloud filtering method. Compared with the popular filter algorithm based on support vector machines (SVM), the error of this method is reduced by 0.1%-0.4%.

Key words remote sensing; point cloud filter; skewness balance; light detection and ranging

OCIS codes 280.3420; 100.5010; 140.3490

1 引言

机载激光雷达(LiDAR)测量技术能够低成本、快速、大范围实时获取高精度三维点云,从而生成数字高程模型(DEM)产品^[1]。而为了能从数字表面模型(DSM)数据中提取数字地面模型(DTM)以及

建筑物、植被等激光脚点,首先应该采取一定的规则和数学模型将地面点和非地面点(包括房屋、植被等)区分开来,这种处理过程就叫机载 LiDAR 点云滤波^[2]。

目前已经有很多滤波算法的具体应用^[3],如基于坡度理论的滤波算法^[4]、基于最小区域理论的滤

收稿日期: 2017-09-15; 收到修改稿日期: 2017-10-08

基金项目: 国家自然科学基金(61672472)、中北大学科学研究基金(XJJ2016024)、中北大学电子测试技术重点实验室开放基金(ZDSYSJ2015005)

作者简介: 韩晓峰(1989—),男,硕士研究生,主要从事 LiDAR 数据处理与应用方面的研究。E-mail: 511310204@qq.com

导师简介: 杨风暴(1968—),男,教授,博士生导师,主要从事信息融合方面的研究。

E-mail: 18903438847@163.com(通信联系人)

波方法^[5]、基于面理论的滤波方法以及基于数学形态学原理的滤波方法。而由 Bartels 等^[6]于 2006 年提出的偏度平衡方法作为一种统计滤波方法,具有免阈值的优势。该算法适用于平坦区域,但在山坡区域容易将山坡点误分类为对象点,滤波误差较大。2010 年, Sithole 等^[7]对该算法进行改进,首先判读研究区域是否为山区,然后进行针对处理,但改进算法在滤波结束后,地面点云中大量非地面点云。2015 年,林金彦等^[8]提出了一种基于渐进形态学开运算和偏度平衡法的滤波方法,提高了滤波的适应性,但由于该方法只针对 DSM 数据进行滤波,因此无法排除 DSM 数据中存在的数据空洞干扰。

本文通过分析造成 LiDAR 数据空洞的原因,发现其主要是由于 LiDAR 的激光脉冲波长一般为 1040~1060 nm,恰好位于水体的强吸收带^[9],导致水体对激光脉冲没有回波信息,所以在河流、湖泊区域没有点云数据或者点云的局部密度很低,而且某些建筑物的顶部或者道路的特殊材质也可以导致激光脚点密度较低。然而光谱信息受这些干扰因素影响较小,可以将其作为点云滤波时的一种有效辅助手段。因此,本文在传统偏度平衡点云滤波的基础上,对迭代过程加以改进,通过对比光谱相似度指导点云滤波过程,不仅有效避免了 DSM 中数据空洞的干扰和有效降低了滤波误差,而且在一定程度上减少了迭代次数,提高了滤波速度。

2 算法原理

2.1 传统偏度平衡算法

由中心极限定理可知,自然状态下测量的样本数据服从正态分布^[10]。根据这一原理,可以假设 LiDAR 数据中的非地面点会扰乱正态分布,通过去除这些非地面点,可以得到满足正态分布的地面点。

已知对称性是正态分布的重要特性之一,而均值三阶矩是衡量一个分布对称性的重要度量^[11],通常将其定义为偏度^[12-13],其数学表达式为:

$$s_k = \frac{1}{N \cdot \sigma^3} \cdot \sum_{i=1}^N (S_i - \mu_a)^3, \quad (1)$$

式中 N 表示 LiDAR 点总数, S_i 表示单个对象点, σ 为样本标准方差, μ_a 样本均值, σ 和 μ_a 定义如下:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N-1} \cdot \sum_{i=1}^N (S_i - \mu_a)^2}, \quad (2)$$

$$\mu_a = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N S_i. \quad (3)$$

若 s_k 大于零,则称该分布为正偏态;若 s_k 小于

零,则称该分布为负偏态; s_k 绝对值越大,表示其偏离程度越大,而标准正态分布的偏度为零^[14-15]。

传统的偏态平衡算法在存在数据空洞的数据中容易将地面点错分类为非地面点,为了消除这种干扰,引入多光谱数据指导滤波过程并在原有基础上对算法进行了改进。

2.2 多光谱数据指导的偏态平衡改进算法

本研究所述方法在基于偏态滤波的基础上,对传统的偏态平衡方法进行改进。对彩色图像进行合理假设,认为在彩色图像当中光谱值接近的点为相同类型点。首先对多光谱数据进行灰度化处理;然后将偏度平衡过滤出的非地面点结合灰度图像,以非地面点为中心在灰度图上构建窗口;最后在构建的窗口内通过比较相似度找出窗口内与中心点光谱相似的点,将这些点统一归类为非地面点进行处理。具体流程如图 1 所示。

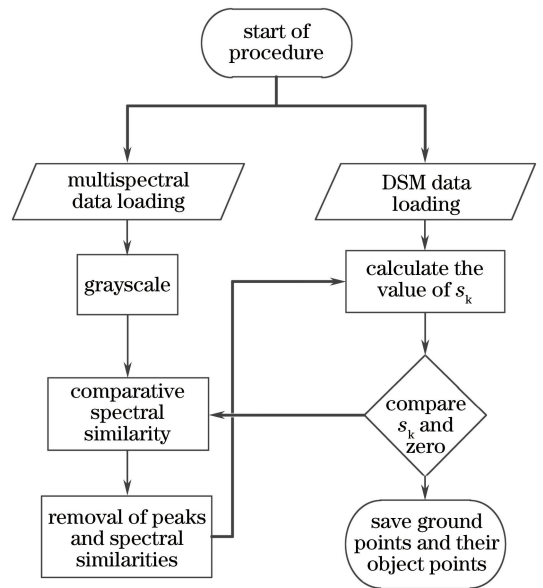


图 1 方法流程图

Fig. 1 Method flow chart

多光谱数据指导的点云滤波步骤流程如下所示:

步骤 1: 分别载入多光谱数据与 DSM 数据。对多光谱数据进行灰度化,同时计算 DSM 数据的 s_k 值。当 s_k 值大于零时执行步骤 2,当 s_k 值小于等于零时执行步骤 3。

步骤 2: 光谱相似度对比。当 s_k 值大于零时,找出 DSM 数据中的最高点 $P(i, j)$,并在多光谱数据中找出与之对应的点 $Q(i, j)$,然后对点 $Q(i, j)$ 进行光谱相似度对比。通过比较将与 $Q(i, j)$ 光谱相似的点统一作为地面点滤除,然后返回步骤 1。

光谱相似度的对比方法,就是根据生成的灰度图像,比较单个像素点与临近点灰度值的差值,对差值进行阈值判定,以此来生成光谱相似矩阵。以 3×3 的邻域窗口为例,将中心点像素值与周围点像素值逐个做差,并对差值求绝对值。然后设定一个阈值 S ,当绝对值大于 S 时对应位置像素点的值置

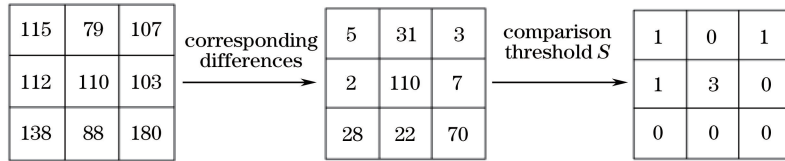


图2 光谱相似矩阵生成方法

Fig. 2 Method of spectral similarity matrix generation

通过实验对比,本研究选取 151×151 的窗口生成结构矩阵,这样选取的窗口与图像中植被的大小相似,有效保留了细节信息。通过实验发现,不同地物的光谱差值大于5,因此将阈值设定为5,进而进行光谱相似度比较。

步骤3:当 s_k 值小于等于零时,将滤除掉的点统一保存为非地面点,剩余的点统一保存为地面点,得到最终结果。

3 实验结果

3.1 实验数据

实验所用数据由国际摄影测量与遥感学会委员会(ISPRS)提供,拍摄于德国法伊英根城区,该地区位于德国斯图加特市,地理位置为东经 $8^{\circ}58'$,北纬 $48^{\circ}56'$ 。数据由光谱图像与LiDAR DSM数据两部分组成。其中DSM数据通过Match-T软件对原始点云数据匹配处理生成,空间分辨率为9 cm;光谱空间分辨率为8 cm,光谱数据是由近红外波段、红色波段、绿色波段三个波段组成,不仅能够满足结构矩阵生成,也为后续实验中进一步进行地物分类提供了基础。点云和光谱信息分别在不同时间获取,具体参数见表1。

表1 法伊英根数据参数

Table 1 Data parameters of Vaihingen

Data	Transducer	Flight altitude / m	Point cloud density / m^{-2}	Coverage area / km^2
Point cloud	ALS50	500	6.7	2.4
Spectrum	DMC	900	0.08	2.4

3.2 实验结果对比

图3为所提方法与传统偏态平衡方法的效果对比。实验分别选取了不同地区的4组图像对方法进

行验证。图3中第一行为4个不同街区获取的DSM数据;第二行为与其对应的假彩色图像;第三行为对应地区的标定图像,其中深蓝色表示建筑区域,绿色表示植被区域;第4行为所提方法的点云滤波结果;第5行为传统偏态平衡方法的点云滤波结果。通过对比可以看出,在LiDAR数据获取过程中,由于房顶材料问题造成了某些位置存在高度信息误差,而对应的光谱信息保留完好。将第4行图像与标定图进行对比可以发现,非地面点云基本被滤除。但结果中仍存在少量非地面点云,未被滤除的非地面点云有两类:第一类是与相邻地面点云高

0,当差值小于 S 时对应位置像素点的值置1。结果为1的点都将其归类为与中心点光谱相似的点。

图2为光谱相似矩阵生成方法,图2中以灰度的一个 3×3 邻域为例, S 值假定为5,中心点像素计算结果为3。通过计算可知,窗口中有三个点与中心点光谱相似。

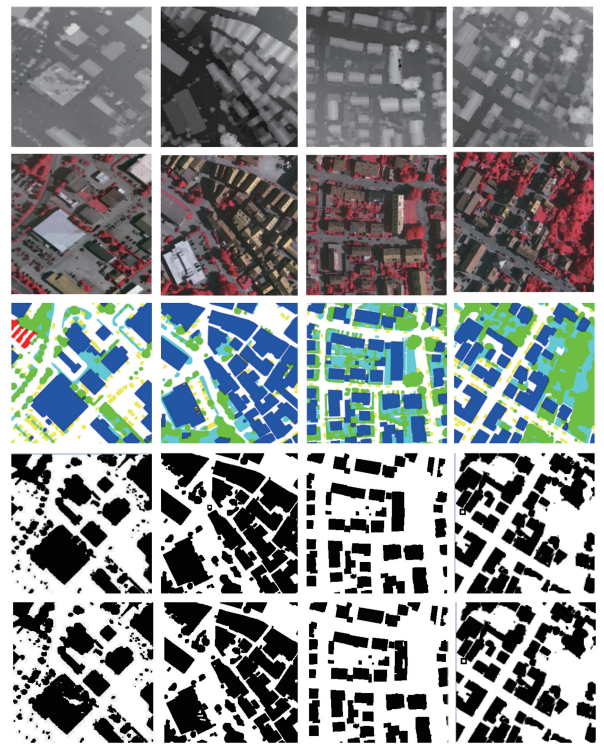


图3 实验结果对比

Fig. 3 Comparison of experimental results

行验证。图3中第一行为4个不同街区获取的DSM数据;第二行为与其对应的假彩色图像;第三行为对应地区的标定图像,其中深蓝色表示建筑区域,绿色表示植被区域;第4行为所提方法的点云滤波结果;第5行为传统偏态平衡方法的点云滤波结果。通过对比可以看出,在LiDAR数据获取过程中,由于房顶材料问题造成了某些位置存在高度信息误差,而对应的光谱信息保留完好。将第4行图像与标定图进行对比可以发现,非地面点云基本被滤除。但结果中仍存在少量非地面点云,未被滤除的非地面点云有两类:第一类是与相邻地面点云高

程相差不大而被误判为地面点的非地面点云(如图3中表示汽车的部分点云),第二类是由于数据空洞而被误判为地面点的非地面点云。传统滤波方法只针对单一数据进行地面点提取,无法有效滤除噪声干扰。所提方法以光谱图像作为指导对 DSM 数据进行滤波,使得滤波过程中同时考虑到了光谱特征与高度信息,有效排除了噪声干扰。

通过计算 DSM 数据点云总数以及实验结果的第一类、第二类误差点个数,进而量化分析实验结果,如表2所示,通过对比结果可以看出,改进后的偏态平衡滤波方法不仅在准确率上有了增长,而且有效减少了运算时间。同时与目前流行的支持向量机(SVM)滤波方法相比,本方法准确率更高、运算速度更快。

表2 不同方法实验结果对比

Table 2 Comparison of experimental results of different methods

Data	Method	Error rate of the first kind /%	Error rate of the second kind /%	Total error	Total time /s
1	Skewness balance	1.84	0.76	2.6	1826
	Proposed method	2.08	0	2.08	1354
	SVM	1.72	0.67	2.39	3639
2	Skewness balance	1.62	1.54	3.16	3022
	Proposed method	1.70	0.73	2.43	2396
	SVM	1.26	1.43	2.69	5628
3	Skewness balance	2.36	1.23	3.59	2357
	Proposed method	2.42	0.78	3.20	2064
	SVM	2.23	1.06	3.29	4382
4	Skewness balance	2.09	0.95	3.04	2931
	Proposed method	2.03	0.22	2.25	2067
	SVM	1.82	0.87	2.69	5210

4 结 论

通过以多光谱信息为指导的方法对 DSM 数据进行点云滤波,以多光谱数据指导点云滤波迭代过程,通过对比光谱信息中光谱相似的点,对 LiDAR 点云进行快速分类。所提方法有效排除了由于 DSM 中数据空洞造成的点云滤波误差,并且在滤除噪声的过程

当中对非地面点的选择由传统的单点选择变成了多点选择,有效减少了程序迭代次数,提高了程序的运行速度。实验证明了该方法的可行性和有效性,为 LiDAR 点云滤波提供了一种高效的手段。

然而所提方法是在传统的偏度平衡点云滤波算法上进行的改进,改进后的算法在山坡区域无法有效地对地面点与非地面点进行分类,因此如何将改进算法与坡度环境下的偏度平衡点云滤波算法进行结合将是下一步的研究方向。

参 考 文 献

- [1] Wang L J, Huang R G, Wan J H, *et al.* A skewness balancing method for LiDAR point cloud filtering [J]. *Hydrographic Surveying and Charting*, 2013, 33(5): 42-45.
王力军, 黄荣刚, 万剑华, 等. 一种基于偏度平衡的 LiDAR 点云滤波方法 [J]. *海洋测绘*, 2013, 33(5): 42-45.
- [2] Hu Y J, Cheng P G, Chen X Y, *et al.* The analysis and comparison of airborne LiDAR point cloud filter algorithms [J]. *Journal of Geomatics Science and Technology*, 2015(1): 72-77.
胡永杰, 程朋根, 陈晓勇, 等. 机载激光雷达点云滤波算法分析与比较 [J]. *测绘科学技术学报*, 2015(1): 72-77.
- [3] Bartels M, Wei H. Segmentation of LIDAR data using measures of distribution [J]. *International Archives of Photogrammetry*, 2012: 289-304.
- [4] Weidner U, Förstner W. Towards automatic building extraction from high-resolution digital elevation models [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 1995, 50(4): 38-49.
- [5] Cobby D M, Mason D C, Horritt M S, *et al.* Two-dimensional hydraulic flood modelling using a finite-element mesh decomposed according to vegetation and topographic features derived from airborne scanning laser altimetry [J]. *Hydrological Processes*, 2003, 17(10): 1979-2000.
- [6] Bartels M, Wei H, Mason D C. Wavelet packets and co-occurrence matrices for texture-based image segmentation [C]. *IEEE Conference on Advanced Video and Signal Based Surveillance*, 2005: 428-433.
- [7] Sithole G, Vosselman G. Automatic structure detection in a point-cloud of an urban landscape [C]. *IEEE Workshop on Remote Sensing and Data Fusion over Urban Areas*, 2003: 67-71.
- [8] Lin J Y, Zou S L, Hu Y J. LiDAR data filtering

- method based on progressive morphological open operation and skewness balancing method [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2015 (16): 351-354.
- 林金彦, 邹时林, 胡永杰. 基于渐进形态学开运算和偏度平衡法的 LiDAR 数据滤波方法[J]. *安徽农业科学*, 2015(16): 351-354.
- [9] Zhang Y J, Wu L, Lin L W, *et al.* Automatic extraction of water bodies based on LiDAR data and aerial images [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2010, 35 (8): 936-940.
- 张永军, 吴磊, 林立文, 等. 基于 LiDAR 数据和航空影像的水体自动提取[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2010, 35(8): 936-940.
- [10] Duda R, Hart P, Stork D. *Pattern classification* [M]. New York: John Wiley & Sons, 2000.
- [11] David F N. *A statistical primer* [J]. *A Statistical Primer*, 1953, 24(5): 338-343.
- [12] Longhi P, Mussini T, Orsenigo R, *et al.* Redetermination of the standard potential of the mercuric oxide electrode at temperatures between 283 and 363 K and the solubility product constant of mercuric hydroxide [J]. *Journal of Applied Electrochemistry*, 1987, 17(3): 505-514.
- [13] Miao Q G, Guo X, Song J F, *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.
- [14] Duan Y H, Zhang A W, Liu Z, *et al.* A Gaussian inflexion points matching method for Gaussian decomposition of airborne LiDAR waveform data [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, 51 (10): 102801.
- 段乙好, 张爱武, 刘诏, 等. 一种用于机载 LiDAR 波形数据高斯分解的高斯拐点匹配法[J]. *激光与光电子学进展*, 2014, 51(10): 102801.
- [15] Yue G M, Wu Y H, Hu S X, *et al.* A multi-wavelength simultaneous output laser system for lidar [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2002, 29(s1): 215-217.
- 岳古明, 吴永华, 胡顺星, 等. 用于激光雷达的多波长同时输出激光系统[J]. *中国激光*, 2002, 29(s1): 215-217.