

微地形 DEM 的最佳点云密度选取

魏舟^{1,2}, 李光录¹, 任磊¹

(1. 西北农林科技大学 资源环境学院, 陕西 杨凌 712100; 2. 陕西省土地工程建设集团, 陕西 西安 710000)

摘要: [目的] 通过对微地形 DEM 的最佳点云密度进行分析研究, 从中选取出最佳点云密度, 以实现高效、快速获取地表微地形观测结果的目的, 既可降低计算成本, 又能够保证观测精度。[方法] 通过对多个扫描测次的点云数据进行深入的研究, 确定出针对该数据最佳 DEM 水平分辨率为 4 mm, 对原数据进行 7 种等级的压缩生成对应的 DEM。采用平均误差、中误差、标准差 3 种最常见的 DEM 精度指标对生成的 DEM 进行精度评价分析。[结果] (1) 在点云压缩程度 > 15% 时, 随着点云密度的减小, 平均误差基本没有变化, 维持在极低的数值上; 点云压缩程度 < 15% 时, 平均误差随着点云密度的减小而迅速的增大。(2) 在点云压缩程度 > 10% 时, 随着点云密度的减小, 标准差基本没有变化; 点云压缩程度 < 10% 时, 标准差随着点云密度的减小而迅速增大。(3) 在点云压缩程度 > 20% 时, 随着点云密度的减小, 中误差基本没有变化, 维持在极低的数值上; 点云压缩程度 < 20% 时, 中误差随着点云密度的减小而迅速的增大。[结论] 对比验证分析结果表明, 20% 的点云压缩密度为生成微地形 DEM 最佳的点云密度。

关键词: 点云密度; DEM; 微地形; 数据压缩

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2015)06-0155-04

中图分类号: P225.2, P217

Ascertainment of Optimum Point Cloud Density for Microtopography DEM

WEI Zhou^{1,2}, LI Guanglu¹, REN Lei¹

(1. College of Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. Shaanxi Land Construction Group, Xi'an, Shaanxi 710000, China)

Abstract: [Objective] Through the analysis and research for optimal point cloud density micro DEM, this paper aimed to select the best point cloud density from it to achieve efficient, rapid access to micro-surface topography observations purpose. Upon which the computational cost was expected to be reduced under the precondition of observation accuracy. [Methods] Previous research of point cloud data proved that the optimal level of resolution about the data was 4 mm. The raw data were compressed by 7 ratings: 100%, 75%, 50%, 25%, 10%, 5% and 1% to generate the corresponding DEM. Three most common DEM accuracy indicators: average error, root mean square error, standard deviation were used to evaluate the accuracy of the DEM above. [Results] (1) When the point cloud compression level was set above 15%, the average error unchanged and maintained at a low value with the decrease of point cloud density, when it was compressed < 15%, the average error increased rapidly with the decrease of point cloud density. (2) When the compression of the point cloud was > 10%, standard deviation was in a flat status with the decrease of the point cloud density. When it was < 10%, the standard deviation of point cloud density decreases rapidly with the increasing of point cloud density. (3) When point cloud was compressed over 20%, with the decrease of the point cloud density, root mean square error was in the flat segmentation; when it was < 20%, the root mean square error rapidly increased with the decrease of point cloud density. [Conclusion] The comparison of different compression ratings verified that the optimal compression level to generate micro-topography DEM should be 20%.

Keywords: point cloud density; DEM; microtopography; data compression

收稿日期: 2014-08-15

修回日期: 2014-10-17

资助项目: 陕西省水保局重点科技示范项目“PP 织物袋梯田筑坎技术的试验与推广”(20101003); 水利部科技推广计划项目(TG1308)

第一作者: 魏舟(1988—), 男(汉族), 新疆自治区阿克苏市人, 硕士研究生, 研究方向为地图学与地理信息系统。E-mail: weizhou0414@126.com。

通信作者: 李光录(1964—), 男(汉族), 甘肃省永靖县人, 博士, 副教授, 主要从事土壤侵蚀与土地利用方面的研究。E-mail: guangluli@nwsuaf.edu.cn。

地面三维激光扫描可以直接记录被测物体 3D 模型,扫描获得的点云包含被扫物体表面细节的三维图像,由密集的点组成,各点包含 (X, Y, Z, i) 值,其中 X, Y, Z 是以仪器坐标系表示的该点坐标, i 为接收到的反射信号的强度,相当于二维栅格图像的灰度值^[1]。近些年来三维激光扫描技术被广泛的应用于各类地形变化观测研究中^[2-3]。在微地形的研究过程中,建立高精度的 DEM 是研究微地形变化的关键所在^[4],点云数据生成 DEM 的精度直接关系着微地形因子定量研究的准确性^[5]。在使用点云数据建立微地形 DEM 的过程中最主要的影响因素来源于 DEM 的水平分辨率和点云密度。许多学者对 DEM 的最佳水平分辨率的确定进行了大量的研究,一般归纳为以下 3 类方法:(1) 基于 DEM 的精度分析,通过计算 DEM 的误差来评价 DEM 优劣性,选出最佳分辨率常用的有:坡度中误差法^[6]、DEM 地形描述误差^[7]、刘学军等人^[8]还提出了分析 DEM 分辨率对坡度计算精度影响,得到了在忽略 DEM 离散模型的面描述误差的情况下 DEM 分辨率的计算公式;(2) 基于 DEM 各地形因子统计数据随 DEM 分辨率的变化趋势,选取稳定变化趋势作为最佳分辨率^[6,9];(3) 根据具体应用模型确定最适宜某一领域的 DEM 分辨率^[10-11]。

点云数据的高程点容量较大,增加了 DEM 生成过程中的计算负荷;同时,点云数据在采集过程中,具有盲目性,为了尽可能详细的记录地形表面的高程数据,将地面三维激光扫描仪的扫描间距设置的尽量小一些,也会增加点云的数量^[12]。一般情况下,扫描获得的点云数据存在大量的冗余,若不进行精简、压缩,在空间和时间上都会严重影响后续计算的效率;在保证数字高程模型完好的前提下,通过适当的方法对点云数据进行压缩、精简,去除冗余,以较少的点云数据来逼近原始点云模型,缩短点云重构时间,减少资源浪费^[13]。由上述分析可知,很多学者对最佳水平分辨率的研究已经相当深入,但是对最佳点云密度的研究却不多,因此本文以最佳点云密度的选择作为研究重点具有一定的现实意义。

1 研究方法

1.1 数据来源

选取陕西省杨凌区北部余家底村的一处裸露坡地作为试验区,试验区的平均坡度约 15° ,地理位置($108^\circ 04' 25'' E, 34^\circ 18' 40'' N$),试验区地处黄土高原南缘,属于暖温带半湿润大陆性季风气候,年平均降雨量约为 637.6 mm。土壤为壤土,灰棕色,土体较

疏松,有粒状或团块状结构,土壤颗粒以粉沙为主,容重约为 1.25 g/cm^3 。试验过程中采用拓普康(GLS-1500)三维激光扫描仪获取地表微地形的点云数据。

1.2 数据处理

通过对数据源最佳 DEM 分辨率研究,根据以往研究^[6-8]确定了本研究数据源的最佳的 DEM 分辨率为 4 mm。研究将从多个测次的点云数据里裁剪出一部分高程点对微地形 DEM 生成过程中最佳点云密度的选择方法进行探讨和分析。

1.2.1 点云数据的压缩 研究从多个测次的点云数据中选取矩形区域的高程点进行点云数据的压缩,依次按照既定的点云压缩等级进行压缩,随机的选择出占原始点云数据不同百分比的高程点数据,点云压缩等级为原始点云数据的 100%, 75%, 50%, 25%, 10%, 5%, 1%。点云数据集的压缩利用 ArcGIS 9.3 的“Geostatistical Analyst”模块中的“Created Subsets”命令实现;该命令能够按照用户设定的压缩百分比,从原始点云数据集中随机的选择出相应压缩密度的新数据集。最后,利用各密度等级压缩得到的点云数据集插值生成对应的 DEM,因前文已经提到本数据对应的最佳分辨率为 4 mm,故在 DEM 的生成过程中,选用 4 mm 的水平分辨率。

1.2.2 DEM 精度评价 研究选取平均误差(mean error, ME),标准差(standard deviation, SD)和中误差(root mean square error, RMSE) 3 个常见的 DEM 精度指标进行评价。为了比较各密度等级 DEM 的精度差异,这里假设 100% 点云密度的 DEM 高程值为真值 Z ,其他密度等级的 DEM 高程值为预测值 z ,将误差定义为 $\epsilon = Z - z$ 。设 n 为误差的个数,则平均误差,标准差,中误差的计算方法为:

(1) 平均误差

$$ME = \frac{\sum_{i=1}^n \epsilon_i}{n} \quad (1)$$

(2) 标准差

$$SD = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\epsilon_i - ME)^2}{n}} \quad (2)$$

(3) 中误差

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \epsilon_i^2}{n}} \quad (3)$$

式中: n ——对应的高程点数; ϵ ——误差; i ——点数;ME——平局误差;SD——标准差;RMSE——中误差。

各密度等级 DEM 高程值的提取方法如下,鉴于各密度等级 DEM 采用相同的分辨率生成,因此其拥有共同的栅格数,并且其栅格单元也是一一对应的,针对这种特点,首先利用 ArcGIS 9.3 软件,将各密度

栅格 DEM 文件转换为点要素文件,点数与栅格数相同,点要素的属性为与其对应的栅格单元中心的灰度值,即该栅格处的高程值;然后各密度等级 DEM 都

随机选择出前后一致的 10 000 个点,并统计出各密度 DEM 这 10 000 个点的高程值(表 1),由于数据量较大,只列举部分数据。

表 1 各密度等级 DEM 上 10 000 个随机点的高程值

序号	真值/m		预测值/m				
	Z ₁₀₀ %	z ₇₅ %	z ₅₀ %	z ₂₅ %	z ₁₀ %	z ₅ %	z ₁ %
1	-0.800 9	-0.799 7	-0.805 0	-0.804 7	-0.803 1	-0.798 3	-0.809 4
2	-0.792 5	-0.786 6	-0.803 2	-0.802 8	-0.791 9	-0.787 9	-0.800 3
3	-0.798 7	-0.798 2	-0.804 3	-0.800 0	-0.804 3	-0.798 8	-0.814 7
4	-0.807 1	-0.805 1	-0.804 1	-0.814 9	-0.803 7	-0.808 8	-0.810 7
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
9 997	-1.119 4	-1.120 3	-1.120 0	-1.118 6	-1.119 5	-1.127 6	-1.120 5
9 998	-1.138 5	-1.140 0	-1.137 8	-1.136 4	-1.136 7	-1.138 3	-1.137 2
9 999	-1.129 3	-1.129 1	-1.127 7	-1.127 5	-1.128 8	-1.128 7	-1.126 5
10 000	-1.138 6	-1.138 5	-1.135 3	-1.138 0	-1.137 0	-1.138 2	-1.137 5

2 结果与分析

各密度等级点云数据集及其对应生成的 DEM 如图 1 所示。从图 1 可以看出,随着点云密度等级的减小,高程点的数量逐渐变少,从图 1 可以直观的看到点云变得越来越稀疏,同时,各密度对应的 DEM 仅从人为观测,很难发现其信息含量的不同,因此,研究借助 ArcGIS 9.3 软件,对各密度等级生成的 DEM 的相关参数进行统计,如表 2 所示,从而定量直观的展现不同点云压缩密度数据集及其对应的 DEM 的

不同之处。

从表 2 可以看出,随着点云压缩密度的减小,各等级点云总数从原始的 679 482 个逐步降为 6 795 个,同时采用同样的水平分辨率,在各 DEM 栅格总数相同的前提下,单位栅格单元所含的点数也逐渐减少。平均高程和标准差随着密度的减小而减小,但是幅度却很小,由此也可以看出,仅从 DEM 基础参数入手难以选择出最优的点云压缩密度,因此必须对各密度等级 DEM 的精度进行评价,从而选择出最佳的点云密度。

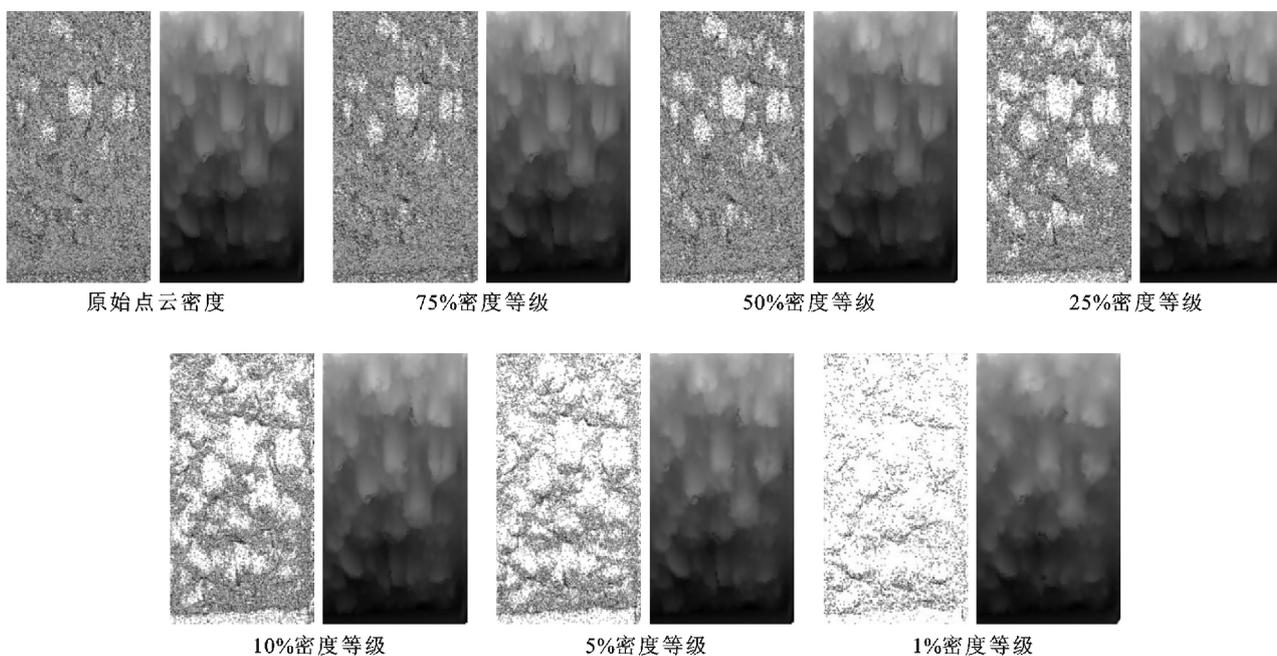


图 1 各密度等级点云及生成的 DEM

表 2 各密度等级生成的 DEM 的参数

占原始数据 百分比/%	点云 数量/个	单位栅格单元 所含点数/个	平均 高程/m	标准 差/m
100	679 482	2.70	-0.955 8	0.094 3
75	509 612	2.03	-0.955 9	0.094 3
50	339 741	1.35	-0.956 4	0.094 2
25	169 871	0.68	-0.956 5	0.094 0
10	67 948	0.27	-0.957 1	0.093 9
5	33 974	0.14	-0.957 6	0.093 8
1	6 795	0.03	-0.960 7	0.093 1

利用表 1 中的数据,代入公式(1)~(3)中,分别求得点云密度等级 75%,50%,25%,10%和 5%,1%的 DEM 相对于密度等级 100%真值 DEM 的平均误差,标准差和中误差,并分别以这 3 个评价指标为纵坐标,以点云密度等级为横坐标,绘制 DEM 评价指标随点云密度变化的散点图,将变化趋势进行曲线拟合(如图 2 所示)。从图 2 中的 3 条拟合曲线可以看出,为了保证压缩后点云生成的 DEM 精度与原始点云密度 DEM 精度相似,3 个评价指标所得到的最佳点云密度的选择范围分别是:平均误差(75%~15%),标准差(75%~10%),中误差(75%~20%),综合比较下,研究选取 3 个区间交叉区域的最小值,20%的点云压缩密度作为生成微地形 DEM 最佳的点云密度,因为此等级生成的 DEM 与原始点云密度生成的 DEM 相对比,它的平均误差、标准差和中误差都极小,也就是说 20%密度等级下的 DEM 所反映的地形表面信息与 100%密度等级下的 DEM 没有显著的不同。20%即为该点云数据对应的最佳点云密度。

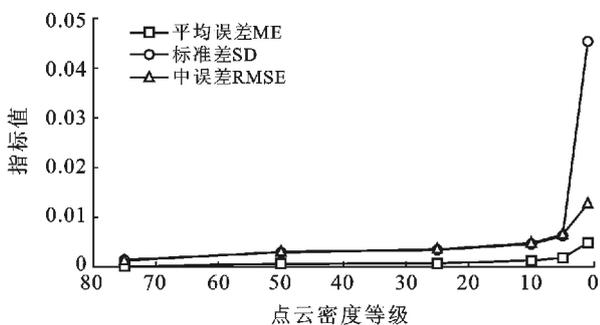


图 2 各精度指标随点云密度变化趋势

3 结果验证与讨论

上述数据处理过程得出最佳点云密度为 20%,但是最佳点云密度仅仅通过平均误差、标准差、中误差三者关系推断是不够的,必须用实际生成的 DEM 来进行验证。由图 3 可以看出,20%的点云密度与

100%点云密度生成的 DEM 没有明显的差异,由表 3 可以看出两者之间的点云数据量差距却十分明显,但平均高程和标准差差异并不显著,因此可以使用 20%的点云密度代替 100%的点云密度来进行 DEM 的相应计算,降低计算成本,提高计算效率。

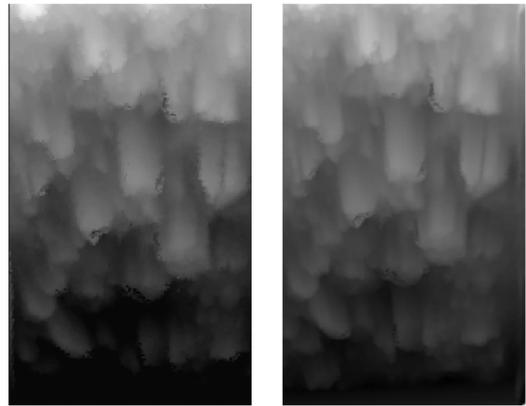


图 3 原始点云密度、20%点云密度生成 DEM 对比

表 3 20%与 100%点云密度生成的 DEM 的参数

占原始数据 比例/%	点云 数量/个	单位栅格 所含点数/个	平均 高程/m	标准差/ m
100	679 482	2.70	-0.955 8	0.094 3
20	158 741	0.48	-0.956 7	0.094 0

4 结论

(1) 在点云压缩程度 $> 15\%$ 时,随着点云密度的减小,平均误差基本没有变化,维持在极低的数值上;点云压缩程度 $< 15\%$ 时,平均误差随着点云密度的减小而迅速的增大。

(2) 在点云压缩程度 $> 10\%$ 时,随着点云密度的减小,标准差基本没有变化;点云压缩程度 $< 10\%$ 时,标准差随着点云密度的减小而迅速的增大。

(3) 在点云压缩程度 $> 20\%$ 时,随着点云密度的减小,中误差基本没有变化,维持在极低的数值上;点云压缩程度 $< 20\%$ 时,中误差随着点云密度的减小而迅速的增大。

(4) 分析可知,最佳的点云密度压缩程度为 20%。

[参 考 文 献]

- [1] 任磊. 基于地面三维激光扫描技术的坡面微地形 DEM 研究[D]. 陕西 杨凌:西北农林科技大学,2014.
- [2] 张国辉. 基于三维激光扫描仪的地形变化监测[J]. 仪器仪表学报,2006(27):96-97.
- [3] 朱良君,张光辉. 地表微地形测量及量化方法研究综述[J]. 中国水土保持科学,2013,11(5):114-122.

(下转第 163 页)

- [2] 杨学震,钟炳林,谢小东,等. 丘陵红壤的土壤侵蚀与治理[M]. 北京:中国农业出版社,2005:87-95.
- [3] 王维明,陈明华,林敬兰,等. 长汀县水土流失动态变化及防治对策研究[J]. 水土保持通报,2005,25(4):73-77.
- [4] 孙佳佳,于东升,史学正,等. 植被叶面积指数与覆盖度定量表征红壤区土壤侵蚀关系的对比研究[J]. 土壤学报,2010,47(6):1060-1066.
- [5] 史东梅,卢喜平,蒋光毅. 紫色丘陵区降雨侵蚀力简易算法的模拟[J]. 农业工程学报,2010,26(2):116-122.
- [6] 金平伟,向家平,李万能,等. 植被对南方红壤丘陵区土壤侵蚀的影响研究[J]. 亚热带水土保持,2014(1):1-4.
- [7] 赵护兵,刘国彬,曹清玉. 黄土丘陵区不同植被类型对水土流失的影响[J]. 水土保持通报,2004,12(2):153-155.
- [8] 张晓明,余新晓,武思宏,等. 黄土区森林植被对坡面径流和侵蚀产沙的影响[J]. 应用生态学报,2005,16(9):1613-1617.
- [9] 李钢,梁音,曹龙熹. 次生马尾松林下植被恢复措施的水土保持效益[J]. 中国水土保持科学,2012,6(6):25-31.
- [10] 韩永刚,王维明,杨玉盛. 闽北不同土地利用方式径流量动态变化特征[J]. 水土保持通报,2006,13(5):262-266.
- [11] 章俊霞,李小军,左长清. 南方红壤入渗影响因素研究[J]. 中国水土保持,2008(6):27-29.
- [12] 张展羽,张国华,左长清,等. 红壤坡地不同覆盖措施的水土保持效益分析[J]. 河海大学学报:自然科学版,2007,35(1):1-4.
- [13] 张成梁,程冬兵,刘士余. 红壤坡地果园植草的水土保持效应[J]. 草地学报,2006,14(4):365-369.
- [14] 范连玉,孙亚茹,刘凤英,胡枝子营造试验研究及水土保持效益分析[J]. 黑龙江水专学报,2006,33(3):115-116.
- [15] 姚环,沈骅,李颢,等. 香根草固土护坡工程特性初步研究[J]. 中国地质灾害与防治学报,2007,18(2):63-68.
- [16] 尹忠东,丛晓红,李永慈. 江西丘陵红壤区坡面径流及其与降雨关系的影响因素[J]. 水土保持通报,2008,28(4):7-10.
- [17] 陈鹏飞,陈丽华,王宇,等. 黄土丘陵沟壑区不同土地利用类型对坡地产流、产沙的影响[J]. 生态与农村环境学报,2010,26(3):199-204.
- [18] 樊登星,余新晓,贾国栋,等. 北京山区灌草坡面水土流失特征及其影响因素[J]. 中国水土保持科学,2014,2(2):24-28.

(上接第 158 页)

- [4] 高树静. 地表糙度的特征与分析[D]. 陕西 杨凌:西北农林科技大学,2010.
- [5] 李瑾杨,范建容,徐京华. 基于点云数据内插 DEM 的精度比较研究[J]. 测绘与空间地理信息,2013(1):011.
- [6] Hutchinson M F. A locally adaptive approach to the interpolation of digital elevation models[C]// Santa Fe, New Mexico: NCGIA National Center for Geographic Information and Analysis, Proceedings, Third International Conference/Workshop on Integrating GIS and Environmental Modeling. 1996:21-26.
- [7] 汤国安,龚健雅. 数字高程模型地形描述精度量化模拟研究[J]. 测绘学报,2001,30(4):361-365.
- [8] 刘学军,龚健雅,周启鸣,等. DEM 结构特征对坡度坡向的影响分析[J]. 地理与地理信息科学,2005,20(6):1-5.
- [9] 何政伟,许辉熙,张东辉,等. 最佳 DEM 分辨率的确定及其验证分析[J]. 测绘科学,2010,35(2):114-116.
- [10] Thompson J A, Bell J C, Butler C A. Digital elevation model resolution: Effects on terrain attribute calculation and quantitative soil-landscape modeling[J]. Geoderma, 2001,100(1):67-89.
- [11] Florinsky I V, Kuryakova G A. Determination of grid size for digital terrain modelling in landscape investigations-exemplified by soil moisture distribution at a micro-scale[J]. International Journal of Geographical Information Science, 2000,14(8):815-832.
- [12] 朱宁宁,姚方芳. 点云密度设置在激光扫描中的应用研究[J]. 河南城建学院学报,2014,23(1):63-66.
- [13] 李青蒙. 激光扫描点云处理技术研究[D]. 辽宁 大连:大连海事大学,2013.