

文章编号: 1674—8247(2023)03—0074—07

DOI: 10. 12098/j. issn. 1674 - 8247. 2023. 03. 015

复杂艰险山区高分辨率 DEM 制作方法应用分析

包建强 王 义 许懿娜 孙越乔

(中铁二院工程集团有限责任公司, 成都 610031)

摘 要:针对复杂艰险山区高分辨 DEM 原始数据形式多样、制作方法众多的现状,本文研究了基于不同原始数据下的多种 DEM 制作方法的优劣性和应用场景。以复杂艰险山区的机载 LiDAR 点云和等高线、高程点数据作为原始数据,利用 ANUDEM 法、构 TIN 法、自然邻域法和反距离加权法等 4 种常用插值方法制作高分辨率 DEM,对基于不同原始数据下利用不同方法制作 DEM 的精度和效率进行了对比分析。研究结果表明:(1)自然邻域法和构 TIN 法,制作效率高,地形保真性最优,适用于复杂艰险山区高分辨率 DEM 生产;(2)ANUDEM 法效率较低,适用性较差。

关键词:复杂艰险山区;高分辨率 DEM;空间插值;应用分析

中图分类号: P208

文献标识码: A

Application Analysis of the Methods of Creating High-resolution DEM in Challenging Mountainous Areas

BAO Jianqiang WANG Yi XU Yina SUN Yueqiao

(China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Chengdu 610031, China)

Abstract: Considering that high-resolution DEM raw data in challenging mountain areas are in various forms and there are many modeling methods, this paper studies the pros and cons and the application scenarios of various methods of creating DEM based on different raw data. For this purpose, high-resolution DEMs were formed by the ANUDEM method, TIN method, natural neighbor method, and inverse distance weighting method with airborne LiDAR point cloud, contour, and elevation point data as raw data, and the accuracy and efficiency of DEM made by different methods with different raw data were compared and analyzed. The results show that: (1) the natural neighbor method and TIN method have high efficiency and optimal terrain fidelity, and are suitable for creating high-resolution DEM in challenging mountain areas; (2) the ANUDEM method has low efficiency and poor applicability.

Keywords: challenging mountainous areas; high-resolution DEM; spatial interpolation; application analysis

数字高程模型(Digital Elevation Model, DEM)是一种对地球表面地形起伏特征的离散数字表达的三维向量有限序列^[1],在测绘、水文气象、地貌地质、工程建设、军事和环境规划等领域都有重要应用^[2],是国家空间数据基础设施和基础设施建设中建筑信息模

型(Building Information Modeling, BIM)正向设计^[3]的主要数据之一。空间插值生成 DEM 是目前制作 DEM 的主要技术方法^[4]。复杂艰险山区由于地势跌宕起伏、沟壑纵横,高海拔、大高差^[5-6],陡崖众多,原始数据获取困难^[7-8],高分辨率 DEM 成果存在部分地形特征区

收稿日期:2022-01-29

作者简介:包建强(1994-),男,工程师。

引文格式:包建强,王义,许懿娜,等. 复杂艰险山区高分辨率 DEM 制作方法应用分析[J]. 高速铁路技术,2023,14(3):74-80.

BAO Jianqiang, WANG Yi, XU Yina, et al. Application Analysis of the Methods of Creating High-resolution DEM in Challenging Mountainous Areas [J]. High Speed Railway Technology, 2023, 14(3):74-80.

域无法有效表达、地貌特征和局部形态失真等问题。同时,不同空间插值方法的选择对DEM的制作精度^[9]和效率^[10]有较大影响。

众多学者和专家对各DEM空间插值方法在各地形地貌特征下的适应性进行了大量的研究。谭衢霖^[11]等基于1:50 000地形图等高线,选择了3种地貌类型,利用6种空间插值方法生成DEM并对其进行了精度对比分析;徐潇^[12]等基于复杂地貌1:50 000等高线,利用5种插值方法制作DEM,并评价了各方法的DEM质量和精度;杨勤科、张彩霞^[13-17]等分别基于黄土高原典型丘陵沟壑区域1:10 000和1:250 000地形图,分析了相对于构TIN法制作DEM,ANUDEM法在黄土沟壑区地形表达中的优越性;张笑等基于南方符合地貌区1:50 000地形图等高线和高程点,利用6种插值方法制作DEM并在高程、坡度和坡向等地形因子提取精度方面进行了详细分析。

综上所述,针对复杂艰险山区高分辨率DEM制作方法的应用分析研究相对较少,而制作DEM的主要原始数据来源有机载激光雷达LiDAR(Light Detection And Ranging)、星载InSAR(Interferometric Synthetic Aperture Radar,合成孔径干涉雷达)^[18]、航空摄影测量法和地形特征点线等^[19]。本文拟分别以复杂艰险山区的机载LiDAR数据、大比例尺1:2 000数字地形图的等高线和高程点为原始数据,利用常用的4种DEM制作方法,制作高分辨率DEM,并进行精度对比和效率分析,以期得出有益结论。

1 DEM制作方法及精度评定

1.1 DEM制作方法

本文基于不同类别原始数据多次反复测试,筛选掉部分空间插值方法(部分插值方法由于插值过程耗时过长,无法完成基于LiDAR点云数据的DEM制作任务),选择了4种常用且有效的DEM制作方法:ANUDEM法(Australia National University DEM)、构TIN法(Triangulated Irregular Network,不规则三角网)、自然邻域法(Natural Neighbor, NNI)和反距离加权法(Inverse Distance Weighted, IDW)。

(1) ANUDEM法

ANUDEM是基于澳大利亚国立大学Hutchinson教授提出的DEM插值算法(简称Hutchinson算法)开发的专业化DEM制作软件。该软件可以建立水文地貌关系正确的DEM(Hydrologically Correct DEM, HcDEM)^[20],目前被集成到ARCGIS9.0及其以后的版本中,通过“地形转栅格(TopoToRaster)”工具实现,其原

始数据据可包括等高线、高程点、水系(河流、湖泊)、下陷点、陡崖线和内插边界等。

ANUDEM采用了嵌套式多分辨率迭代计算方法^[21],既具备局地插值方法的高效性,又不失全局插值方法的连续性等优点;通过引入粗糙度罚函数,在预测值接近测量值的同时,使拟合平面平滑;通过地形强化算法去除原始数据中的伪下陷点,保证沟道系统的连续性和山脊、流水线等地貌特征线的正确表现;通过局部适应性处理进一步反应地形突变^[22]。ANUDEM插值方法能够充分保留地表的水文要素,却无法顾及山体的结构特征。

(2) 构TIN法

构TIN法基于原始数据,通过多层高程信息构建TIN,再将TIN插值得到规则格网的DEM。该方法简单易用,在我国应用广泛。

(3) 自然邻域法

自然邻域法通过找到距查询点最近的输入样本子集,并基于区域大小按比例对样本应用权重进行插值。该方法具有局部性,仅使用查询点周围的样本子集,且保证插值高度在所使用的样本范围之内。

(4) 反距离权重法

反距离权重法假定每个测量点都有1种局部影响,而这种影响会随着距离的增大而减小。该方法为距离预测位置最近的点分配的权重较大,而权重却作为距离的函数而减小,如式(1)所示。

$$H_0 = \frac{\sum_{i=1}^n H_i \frac{1}{d_i^k}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_i^k}} \quad (1)$$

式中: H_0 ——0点的估计值;

H_i ——控制点*i*的*H*值;

d_i ——控制点*i*到0点的距离;

n ——控制点总数;

k ——指定的幂。

1.2 应用效果评定

结合相关研究成果,利用检查点法、等高线回放法、三维可视化法和制作时间对比来完成各方法制作DEM的应用效果评定。

(1) 检查点法和效率分析

检查点法指先将检查点按格网或任意形式进行分布,将这些点处的DEM高程和实际高程逐一较差,然后计算出中误差。本文将各种插值方法得到的DEM成果与已知点实际高程数据进行较差比较,采用较差最大值、较差最小值、较差总和、绝对值平均误差

和中误差等指标进行评价分析。

同时,试验分析均采用相同配置的计算机和相同版本的应用软件完成,以保证各方法制作 DEM 的耗时间对比结果真实可靠。

(2)等高线回放法

为提高 DEM 制作成果评价的可靠性,专家学者提出并应用了等高线回放法来评价 DEM 内插精度:将内插生成的 DEM 反生成等高线,与原始等高线进行比对检查,分析等高线误差状况,探测不同插值方法中的 DEM 高程数据中的异常部分。本文采用回放等高线与机载 LiDAR 点云数据、原有等高线和高程点对比,以完成不同原始数据的分别评价。

(3)可视化分析法

为进一步分析和展示各方法制作 DEM 成果,本文制作基于不同原始数据的各方法 DEM 晕渲图进行可视化分析。

2 各方法应用分析

基于机载 LiDAR 点云数据和 1:2 000 地形图的高程点和等高线与高程点数据,利用各方法分别制作分辨率为 0.5 m 的 DEM。其中,CH/T 9008.2-2010《基础地理信息数字成果 1:500、1:1 000、1:2 000 数字高程模型》中对高山地 1:2000 DEM 的格网尺寸和精度进行了详细规定,如表 1 所示。本文各方法 DEM 制作成果均以表 1 中相关指标为参考进行评价。

表 1 1:2 000 高山地 DEM 格网尺寸和精度指标表(m)

比例尺	地形等级	格网尺寸	高程中误差	最大允许误差
1:2 000	一级高山地	2	1.50	3.00

2.1 基于LiDAR点云数据的DEM制作应用分析

选择川西高原某地分类后的机载 LiDAR 数据为原始数据,利用上述 4 种方法分别制作 DEM。其中,原始点云数据的检查精度和密度均满足规范中 1:2 000 DEM 的制作要求,数据范围内高差达 625 m,如表 2 所示。

表 2 机载 LiDAR 点云数据详情表

信息类别	信息内容
区域	川西高原地区
海拔范围/m	2 750~3 375
面积/km ²	2.251
地面点数量/个	5 191 867
地面点密度/(点/m ²)	2.3

2.1.1 检查点法和制作效率分析

将研究区域内的 4 216 683 个点作为检查点,分

别提取各方法 DEM 成果在检查点处的高程值,并与检查点原始高程做较差,其统计结果及其制作 DEM 所用时间如表 3 所示。

表 3 基于机载 LiDAR 点云数据的 DEM 制作方法精度和效率

对比表				
对比项目	ANUDEM法	构TIN法	自然邻法	反距离权重法
较差最大值/m	24.445	45.300	37.104	39.800
较差最小值/m	-28.494	-42.500	-39.512	-37.022
误差总和/m	-40 996.641	-40 214.544	2 800.762	-509.390
误差绝对值平均值/m	0.118	0.102	0.093	0.069
较差中误差/m	0.462	0.271	0.224	0.202
检查点数/个	4 216 683	4 216 683	4 216 683	4 216 683
粗差点数量/个	11 622	2 821	1 416	1 270
粗差占比率/%	0.276	0.067	0.034	0.030
粗差点位的平均坡度/(°)	73.17	57.62	83.62	83.55
制作时间	8 min 15 s	2 min 31 s	2 min 29 s	3 min 25 s

由表 3 可知:

(1)各制作方法的 DEM 与检查点的高程较差中误差均小于 1.5 m,较差粗差点(即较差大于表 1 中最大允许误差的点)数量占比均小于 0.30%,满足 1:2 000 高山地 DEM 的制作精度。

(2)ANUDEM 法的中误差和误差绝对值平均值最大,粗差点点数最多,构 TIN 法次之,自然邻域法再次之,反距离权重法的中误差和误差绝对值平均值最小,粗差点最少;从较差的最大最小值分析,构 TIN 法的较差区间最大,ANUDEM 法的较差区间最小;ANUDEM 法、自然邻域法和反距离加权法的粗差点均位于陡崖处(地面坡度大于 70°地形),构 TIN 法的大部分粗差点亦位于陡崖处,小部分粗差点位于其 DEM 的伪下陷点附近;ANUDEM 法、构 TIN 法和反距离权重法获得的 DEM 相对于原始数据的高程整体偏低,而自然邻域法整体偏高。

(3)构 TIN 法和自然邻域法的耗时基本一致且最少,效率最高;反距离权重法次之;而 ANUDEM 法的效率最低,耗时最长,约为构 TIN 法的 3 倍多。

2.1.2 等高线回放法对比结果

利用各方法制作的 DEM 回放等高线(等高距为 2 m),并将其与机载 LiDAR 点云数据进行对比,发现各方法回放的等高线随着坡度的增大与原始数据出现较大的差异。

(1)在非悬崖坡地区域(地面坡度≤45°),整体上各方法制作的 DEM 回放等高线一致性较高,和原始地面点符合性较好,但在等高线平滑性方面存在不

同: ANUDEM 法和自然邻法的等高线较平滑; 构 TIN 法的等高线存在凸包, 部分区域有突变; 反距离权重法的等高线锯齿现象严重。

(2) 在悬崖坡地区域(地面坡度 > 45°), 各方法等高线一致性较差, 与原始地面点符合性也不相同: 构 TIN 法和自然邻域法回放的等高线具有较高的一致性, 同时检查点与回放等高线间存在少量的“点线不符”情况, 且构 TIN 法存在一些凸包等高线; 反距离加权法 DEM 回放的等高线存在个别“点线不符”情况, 与原始点云数据的符合性最好, 但等高线存在较多的锯齿; ANUDEM 法回放的等高线虽然最平滑, 无凸包, 无锯齿, 但存在较多的“点线不符”情况, 在坡度较大

区域存在过度平滑问题。

2.1.3 三维可视化分析

制作基于机载 LiDAR 点云数据的各方法 DEM 成果晕渲图, 进行可视化对比分析, 如图 1 所示。所有的制作方法都能够有效清晰地表达复杂艰险山区的地形起伏信息。其中, ANUDEM 法制作的 DEM 表面最光滑, 构 TIN 法和自然邻域法制作的 DEM 总体光滑程度基本一致, 但是构 TIN 法 DEM 表面存在很多伪下陷点; 相对于另外 3 种方法, 反距离加权法制作的 DEM 光滑程度较低, 存在较多细微褶皱, 其平滑能力较弱。

综上所述, 以复杂艰险山区机载 LiDAR 点云

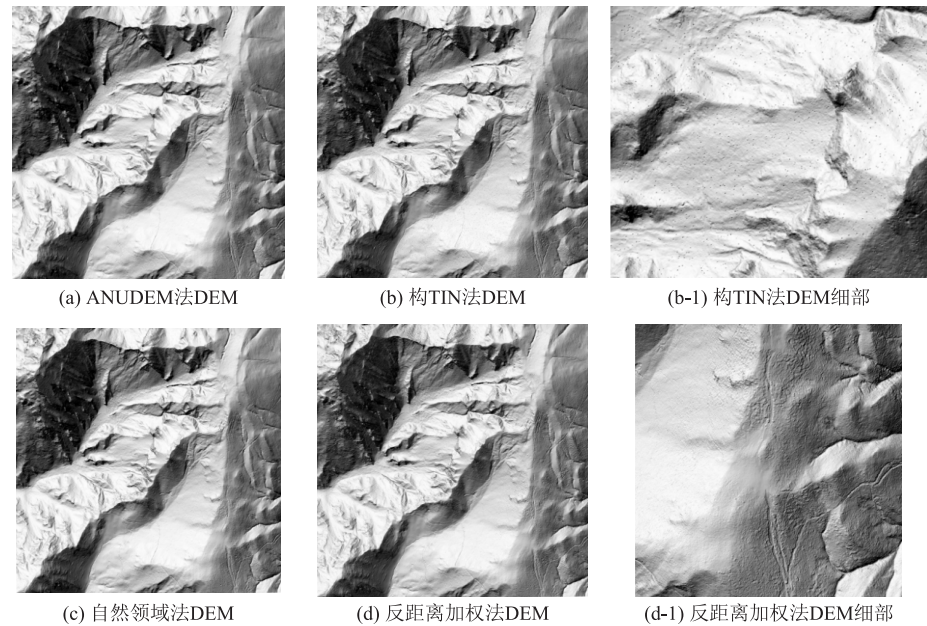


图1 基于机载 LiDAR 点云的各方法 DEM 晕渲成果对比图

数据为原始数据制作高分辨率 DEM 的各方法中, ANUDEM 法在成果精度、制作效率以及悬崖坡地的有效表达上, 其适用性都不强; 而自然邻域法和构 TIN 法适用性较高, 效率较快, 能够有效表达出悬崖坡地的地形信息; 反距离加权法虽然检查点精度指标最优, 效率适中, 但其回放等高线成果锯齿过多, 无法表现出地形无限连续变化^[1]的特点。

2.2 基于等高线和高程点的DEM制作应用分析

选择青藏高原某高山峡谷区域(高差达 950 m)的 1 : 2 000 数字地形图作为原始数据, 提取其等高线(对等高线数据进行采样, 获得大量等高线高程采样点)和高程点, 利用上述 4 种方法分别制作 DEM。其中, ANUDEM 法和构 TIN 法的输入原始数据为等高线和高程点; 自然邻域法和反距离加权法的输入原始数据

为等高线采样点和高程点。等高线和高程点详情如表 4 所示。

表4 等高线和高程点数据详情表

信息类别	信息内容
区域	青藏高原高山峡谷地区
海拔/m	2 949 ~ 3 908
面积/km ²	2. 245
地形图比例尺	1 : 2 000
等高线数量/根	3 966
等高线采样点数量/个	560 795
高程点个数/个	884
等高距/m	2
高程点间距/m	49. 5

2.2.1 检查点法和效率分析

将研究区域内的 884 个高程点作为检查点, 分

别提取各方法 DEM 成果在检查点处的高程值,并与检查点原始高程做较差,统计结果和耗费时间如表 5 所示。

表 5 基于等高线和高程点的 DEM 制作方法精度和效率对比表

制作方法	ANUDEM 法	构 TIN 法	自然邻域法	反距离权重法
最大值/m	1. 891	1. 475	1. 079	1. 425
最小值/m	-3. 725	-2. 400	-1. 554	-1. 241
误差总和/m	-25. 694	6. 763	-23. 705	-8. 262
误差绝对值平均值/m	0. 175	0. 168	0. 143	0. 063
中误差/m	0. 346	0. 263	0. 215	0. 147
制作时间	14 min 35 s	8 s	23 s	31 s

由表 5 可知:

(1)各方法的 DEM 与检查点的高程较差中误差均远远小于 1.5 m,满足 1:2 000 高山地 DEM 的制作精度。ANUDEM 法的中误差和误差绝对值平均值最大,构 TIN 法的次之,自然邻域法再次之,反距离权重法的中误差和误差绝对值平均值最小;从较差的最大最小值分析,ANUDEM 的较差区间最大,自然邻域法的较差区间最小;ANUDEM 法、自然邻域法和反距离权重法获得的 DEM 相对于原始数据的高程整体偏低,而构 TIN 法整体偏高。

(2)构 TIN 法耗时最少,仅为 8 s,效率最高;自然邻域法次之,耗时 23 s;而 ANUDEM 法的效率最低,耗时最长,约为其他方法的 30 倍多。

2.2.2 等高线回放法对比结果

利用各方法制作的 DEM 回放等高线(等高距为 2 m),与原始等高线比分析,检查其一致性,对比成果如图 2 所示。

由图 2 可知:

(1)自然邻域法无论坡度缓急区域,都与原始等高线表现较高的符合程度,并且对原始等高线中不平滑的部分,在保证等高线精度的前提下,进行了合理的优化平滑处理;构 TIN 法无论坡度缓急区域,都与原始等高线表现较高的符合程度,但在陡崖的小部分区域出现了个别锯齿。

(2)反距离加权法无论坡度缓急区域,都与原始等高线的符合程度最差,且等高线有大量的锯齿;ANUDEM 法 DEM 生成的等高线,是 4 种方法中最平滑的,且在非陡崖坡地(坡度<70°)中,与原始等高线的符合程度较高,但在陡崖坡地(坡度≥70°)中符合性相对较差,存在过平滑现象。

2.2.3 三维可视化方法

制作基于等高线和高程点的各方法 DEM 成果晕渲图,进行可视化对比分析,如图 3 所示。所有的制

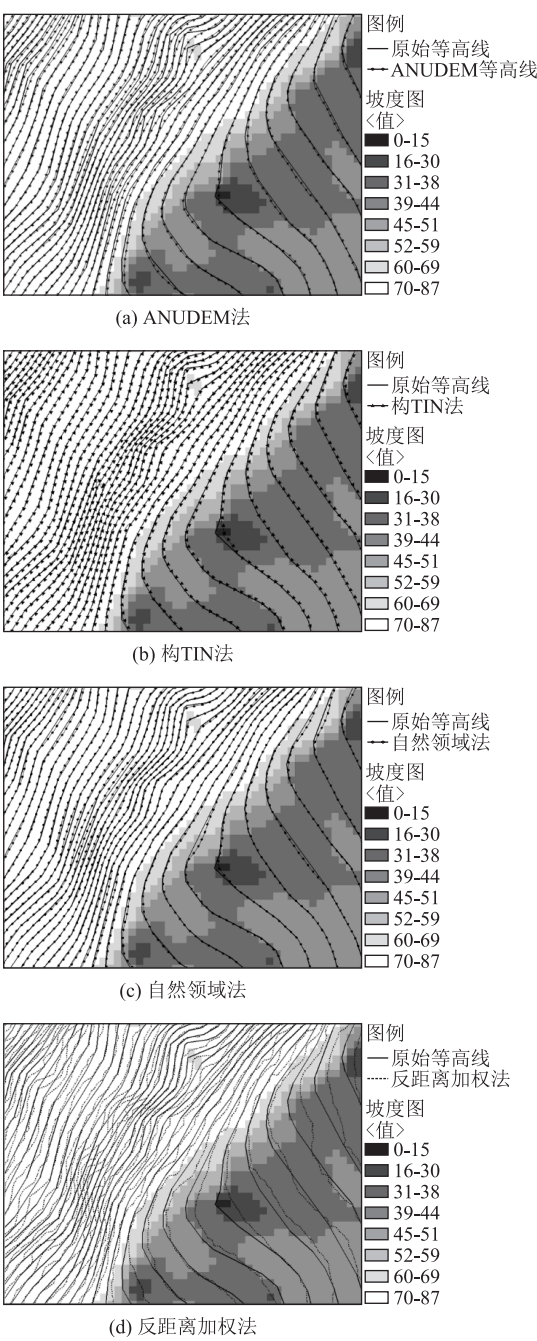


图 2 基于等高线和高程点数据的各方法 DEM 成果回放等高线对比图

作方法都能够有效清晰地表达复杂艰险山区的地形起伏信息。

ANUDEM 法制作的 DEM 表面更加光滑,构 TIN 法和自然邻域法制作的 DEM 总体光滑程度基本一致,但构 TIN 法 DEM 表面存在细微的三角面片;相对于另外 3 种方法,反距离加权法制作的 DEM 光滑程度较低,存在较多的细微褶皱,其平滑能力较弱。

综上所述,以复杂艰险山区 1:2 000 数字地形图等高线和高程点为原始数据制作高分辨率 DEM 的各

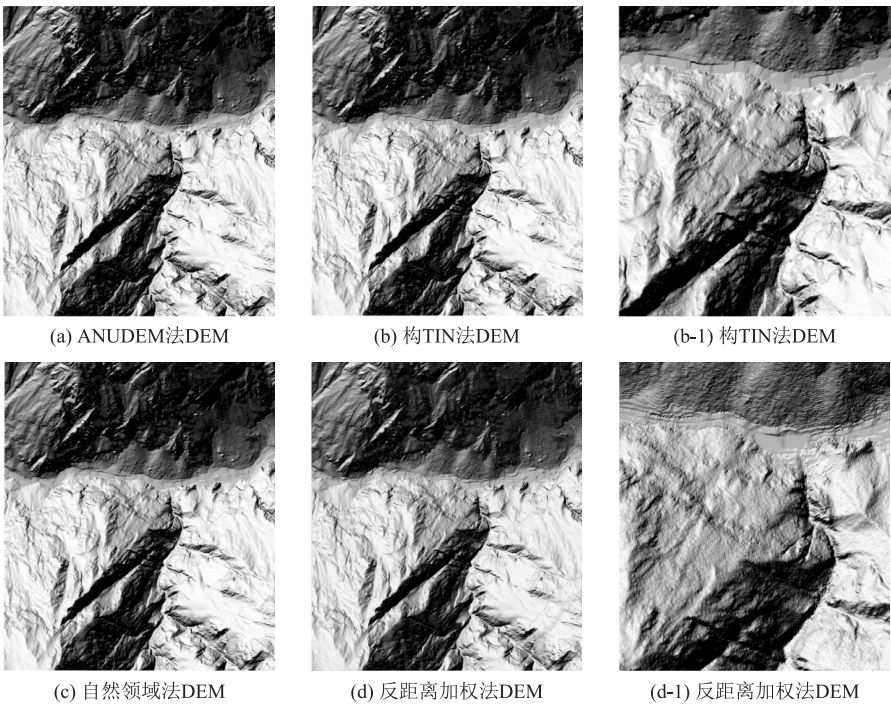


图 3 基于等高线和高程点的各方法 DEM 晕渲成果对比图

方法中, ANUDEM 法虽然表面光滑,但在陡崖坡地中存在过平滑现象,精度相对较低,且其制作效率最低;自然邻域法和构 TIN 法适用性较高,效率较快,能够有效表达陡崖坡地的地形信息;反距离加权法虽然检查点精度指标最优,效率适中,但其回放等高线成果锯齿过多,无法合理有效表达地形信息。

3 结论

本文以复杂艰险山区的机载 LiDAR 点云数据、大比例尺(1 : 2 000)数字地形图的等高线和高程点为原始数据,利用 ANUDEM 法、构 TIN 法、自然邻域法和反距离加权法,分别制作高分辨率 DEM,进行成果应用对比分析,得出以下结论:

(1)在复杂艰险山区,基于不同原始数据,利用不同制作方法获得的高分辨率 DEM 的精度均满足相关规范要求。

(2)ANUDEM 法平滑效果好,但制作效率低,大坡度区域地形信息表达不足,存在过平滑现象;ANUDEM 法能用于复杂艰险山区小范围非悬崖区域的 DEM 成果制作,非量测的可视化展示效果较好。

(3)自然邻域法和构 TIN 法,无论基于何种原始数据,在制作效率和各种地形信息表达上,都具有较高的适用性,适用于复杂艰险山区大范围全区域的 DEM 成果制作,工程应用和大比例尺数字地形图生产效果较好。

(4)反距离加权法制作的 DEM 成果表面褶皱较多,回放等高线锯齿现象严重,不推荐应用于复杂艰险山区高分辨率 DEM 生产。

(5)对复杂艰险山区国家空间基础设施建设和基础设施 BIM 正向设计中核心数据生产具有一定的参考意义。

参考文献

[1] 李志林,朱庆,谢潇. 数字高程模型[M]. 北京: 科学出版社, 2017.
LI Zhilin, ZHU Qing, XIE Xiao. Digital Elevation Model [M]. Beijing: Science Press, 2017.

[2] 汤国安. 我国数字高程模型与数字地形分析研究进展[J]. 地理学报, 2014, 69(9): 1305 – 1325.
TANG Guoan. Progress of DEM and Digital Terrain Analysis in China [J]. Acta Geographica Sinica, 2014, 69(9): 1305 – 1325.

[3] 聂良涛. 面向实体选线设计的铁路线路 BIM 与地理环境建模方法与应用[D]. 成都: 西南交通大学, 2016.
NIE Liangtao. Modeling Method and Application of Railway Line BIM and Geographic Environment for 3D Railway Location Design [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2016.

[4] 汤国安,李发源,杨昕. 黄土高原数字地形分析探索与实践[M]. 北京: 科学出版社, 2015.
TANG Guoan, LI Fayuan, YANG Xin. Exploration and Practice of Digital Terrain Analysis on Loess Plateau [M]. Beijing: Science Press, 2015.

[5] 宋章,魏永幸,王朋,等. 复杂艰险山区地质灾害特征及减灾选线

- 研究[J]. 高速铁路技术, 2020, 11(5): 8-12.
- SONG Zhang, WEI Yongxing, WANG Peng, et al. Research on Geological Disaster Characteristics and Location for Disaster Reduction in Complex and Dangerous Mountainous Areas [J]. High Speed Railway Technology, 2020, 11(5): 8-12.
- [6] 魏永幸, 岳志勤, 李光辉. 复杂艰险山区地质灾害识别与铁路减灾选线[J]. 高速铁路技术, 2019, 10(3): 1-5, 24.
- WEI Yongxing, YUE Zhiqin, LI Guanghui. Identification of Geological Hazards and Disaster Reduction Techniques of Railway Route Selection in Complex Dangerous Mountain Area [J]. High Speed Railway Technology, 2019, 10(3): 1-5, 24.
- [7] 梅熙, 赖鸿斌. 复杂艰险山区铁路 GNSS 高程转换技术研究[J]. 高速铁路技术, 2018, 9(S2): 80-84.
- MEI Xi, LAI Hongbin. Research on GNSS Elevation Conversion Technology for Railway in Complex and Dangerous Mountain Area [J]. High Speed Railway Technology, 2018, 9(S2): 80-84.
- [8] 刘志鹏, 王义. 资源三号卫星影像在复杂艰险山区铁路制图中的应用[J]. 铁道勘察, 2021, 47(3): 6-9, 16.
- LIU Zhipeng, WANG Yi. Application of Resource No. 3 Satellite Image in Complicated and Dangerous Mountain Mapping [J]. Railway Investigation and Surveying, 2021, 47(3): 6-9, 16.
- [9] 张一帆, 王青山. 基于规则格网的 DEM 插值实验[J]. 测绘工程, 2016, 25(2): 17-21, 27.
- ZHANG Yifan, WANG Qingshan. Experiments on DEM Interpolation Based on Regular Grid [J]. Engineering of Surveying and Mapping, 2016, 25(2): 17-21, 27.
- [10] 胡海, 游连, 胡鹏, 等. 数字高程模型内插方法的分析和选择[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2011, 36(1): 82-85.
- HU Hai, YOU Lian, HU Peng, et al. Research on the Choice of Interpolation Methods for Generating DEM [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2011, 36(1): 82-85.
- [11] 谭衢霖, 徐潇, 王浩宇, 等. 不同地貌类型区 DEM 空间内插算法精度评价[J]. 应用基础与工程科学学报, 2014, 22(1): 139-149.
- TAN Qulin, XU Xiao, WANG Haoyu, et al. Accuracy Assessment of DEM Interpolation Algorithms in Different Landform Regions [J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2014, 22(1): 139-149.
- [12] 徐潇, 谭衢霖, 王浩宇, 等. 复杂地貌地形图等高线内插 DEM 算法的精度分析[J]. 遥感信息, 2013, 28(6): 111-115.
- XU Xiao, TAN Qulin, WANG Haoyu, et al. Analysis and Comparison of Contour Interpolation in the Complicated Landform Region [J]. Remote Sensing Information, 2013, 28(6): 111-115.
- [13] 杨勤科, Tim R. McVicar, 李领涛, 等. ANUDEM—专业化数字高程模型插值算法及其特点[J]. 干旱地区农业研究, 2006, 24(3): 36-41.
- YANG Qinke, MCVICAR T R, LI Lingtao, et al. ANUDEM—A Professional DEM Interpolation Software Package [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2006, 24(3): 36-41.
- [14] 杨勤科, Tim R. McVicar, Tom, 等. ANUDEM 和 TIN 两种建立 DEM 方法的对比研究[J]. 水土保持通报, 2006, 26(6): 84-88.
- YANG Qinke, MCVICAR T R, TOM, et al. Comparison of Hydro-Geomorphology Representing between DEMs by TIN and ANUDEM Approaches [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2006, 26(6): 84-88.
- [15] 张彩霞, 杨勤科, 段建军. 一种高质量的数字高程模型(DEM)建立方法: ANUDEM 法[J]. 中国农学通报, 2005, 21(12): 411-415.
- ZHANG Caixia, YANG Qinke, DUAN Jianjun. A Method to Build High Quality DEMs-ANUDEM Method [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2005, 21(12): 411-415.
- [16] 张彩霞, 杨勤科, 段建军. 高分辨率数字高程模型的构建方法[J]. 水利学报, 2006, 37(8): 1009-1014.
- ZHANG Caixia, YANG Qinke, DUAN Jianjun. Method for Establishing High Resolution Digital Elevation Model [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006, 37(8): 1009-1014.
- [17] 杨勤科, Tim R. McVicar, Tom G. VanNiel, 等. 用 ANUDEM 建立水文地貌关系正确 DEM 的方法研究[J]. 测绘科学, 2006, 31(6): 155-157, 10.
- YANG Qinke, MCVICAR T R, VANNIEL T G, et al. Generating a Hydrologically Correct DEM with ANUDEM in the Loess Plateau of China [J]. Science of Surveying and Mapping, 2006, 31(6): 155-157, 10.
- [18] 吴艳兰, 胡海, 胡鹏, 等. 数字高程模型误差及其评价的问题综述[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2011, 36(5): 568-574.
- WU Yanlan, HU Hai, HU Peng, et al. A Review on the Issues in DEM Error and DEM Quality Assessment [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2011, 36(5): 568-574.
- [19] 李孟, 刘丹丹, 陈香, 等. 几种常用 DEM 制作方法的对比分析[J]. 江西测绘, 2012(4): 33-34.
- LI Meng, LIU Dandan, CHEN Xiang, et al. Comparative Analysis of Several Common DEM Production Methods [J]. Jiangxi Cehui, 2012(4): 33-34.
- [20] 高翔, 徐柱. 基于 ANUDEM 与山脊抬升的 DEM 简化[J]. 测绘工程, 2015, 24(11): 54-58, 63.
- GAO Xiang, XU Zhu. DEM Generalization Based on ANUDEM and Ridgeline Uplift Method [J]. Engineering of Surveying and Mapping, 2015, 24(11): 54-58, 63.
- [21] 周兴华, 姚艺强, 赵吉先. DEM 内插方法与精度评定[J]. 测绘科学, 2005, 30(5): 86-88, 7.
- ZHOU Xinghua, YAO Yiqiang, ZHAO Jixian. Research on Interpolation and Accuracy Assessment of DEM [J]. Science of Surveying and Mapping, 2005, 30(5): 86-88, 7.
- [22] 翁进, 陈亚凯, 张禾裕. 基于 DLG 精细化 DEM 的内插算法及其精度评价[J]. 国土资源导刊, 2015, 12(4): 79-84.
- WENG Jin, CHEN Yakai, ZHANG Heyu. Interpolation Algorithm and Accuracy Assessment of Fine DEM Based on DLG Data [J]. Land & Resources Herald, 2015, 12(4): 79-84.