



武汉大学学报(信息科学版)

Geomatics and Information Science of Wuhan University

ISSN 1671-8860, CN 42-1676/TN

《武汉大学学报(信息科学版)》网络首发论文

题目： 顾及空间异质性的断裂地形区高精度 DEM 建模方法
作者： 王兴杰, 陈东兴, 陈传法, 徐联中, 洪壮壮
DOI: 10.13203/j.whugis20230364
收稿日期: 2024-05-27
网络首发日期: 2024-06-21
引用格式: 王兴杰, 陈东兴, 陈传法, 徐联中, 洪壮壮. 顾及空间异质性的断裂地形区高精度 DEM 建模方法[J/OL]. 武汉大学学报(信息科学版).
<https://doi.org/10.13203/j.whugis20230364>



网络首发: 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认: 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

Doi: 10.13203/j.whugis20230364

引用格式:

王兴杰, 陈东兴, 陈传法, 等. 顾及空间异质性的断裂地形区高精度 DEM 建模方法[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2024, Doi:10.13203/j.whugis20230364. (WANG Xingjie, CHEN Dongxing, CHEN Chuanfa, et al. A High Accuracy DEM Interpolation Method Considering the Heterogeneous Distribution of Elevations in Areas with Breaklines[J] *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2024, Doi:10.13203/j.whugis20230364.)

顾及空间异质性的断裂地形区高精度 DEM 建模方法

王兴杰¹ 陈东兴² 陈传法¹ 徐联中¹ 洪壮壮¹

1 山东科技大学测绘与空间信息学院, 山东 青岛, 266590

2 山东省煤田地质局第二勘探队, 山东 济宁, 272100

摘要: 在数字高程模型 (Digital Elevation Model, DEM) 建模过程中, 传统插值方法以地表光滑连续为基本假设且只考虑了采样点和待插值点之间的空间相关性, 忽略了诸如断裂线等不连续地形特征带来的空间异质性影响, 导致断裂线周围的高程被平滑, 进而使得构建的 DEM 失真。针对上述问题, 本文提出了一种顾及空间异质性的多元径向基函数插值方法。该方法耦合了空间距离、高差、法向量三种地形信息, 充分考虑了采样点和待插值点之间的空间相关性和地形特征异质性, 确保地形断裂区 DEM 高精度建模。采用 ISPRS 提供的 10 组公共数据以及 1 组机载 LiDAR 点云数据为研究对象, 将本文方法与结构张量约束的插值方法以及 3 种传统插值方法 (包括标准径向基插值法 (Radial Basis Function, RBF), 不规则三角网法 (Triangulated Irregular Network, TIN), ANUDEM 法 (Australian National University Digital Elevation Model)) 比较表明, 本文方法的平均总误差最小, 插值性能最优, 而且还能较好的保持断裂地形特征。

关键词: 径向基函数插值; 断裂线; 多元核函数; 空间异质性

A High Accuracy DEM Interpolation Method Considering the Heterogeneous Distribution of Elevations in Areas with Breaklines

WANG Xingjie¹ CHEN Dongxing² CHEN Chuanfa¹ XU Lianzhong¹ HONG Zhuangzhuang¹

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

2. Shandong Coal Geology Bureau Second Exploration Team, Jining 272100, China

Abstract: Objectives: In the process of digital elevation model (DEM) modeling, the traditional

收稿日期: 2024-05-27

基金项目: 国家自然科学基金 (42271438); 山东省自然科学基金 (ZR2020YQ26)

第一作者: 王兴杰, 硕士, 主要从事数字地形建模方法研究。1805198457@qq.com

通信作者: 陈传法, 博士, 教授。chencf@ireis.ac.cn

interpolation methods are based on the assumption that the surface is smooth and continuous, only considering the spatial correlation between the sampling point and the interpolated point, while ignoring the influence of heterogeneous distribution of elevations in areas with breaklines. This causes the elevation around the breaklines to be smoothed, and distorts the constructed DEMs. **Methods:** Therefore, this study proposes a multivariate radial basis function interpolation method that takes into account spatial heterogeneity. This method couples three kinds of terrain information, including spatial distance, height difference, and normal vector, and fully considers the spatial correlation and heterogeneity between the sampling point and the interpolated point. **Results:** Taking 10 public datas provided by ISPRS and 1 airborne LiDAR point cloud data as examples, we compared the proposed method with the interpolation method that considers the structural tensor constraint, and three traditional interpolation methods including standard Radial Basis Function (RBF), Triangulated Irregular Network (TIN), Australian National University Digital Elevation Model(ANUDEM). Results show that the average total error of the method in this paper is the smallest, the interpolation performance is the best, and it can better maintain terrain features in the breakline area. **Conclusions:** In short, the quality of the treatment of breakline terrain largely affect the authenticity and accuracy of the DEM's terrain expression. The proposed method can effectively capture the spatial distribution characteristics of breakline terrain, which is conducive to achieving high-quality DEM modeling.

Key words: radial basis function interpolation; breakline; multivariate kernel function; spatial heterogeneity

目前, 高分辨率和高精度 DEM 已成为城市精细化管理、自然资源管理与灾情监测、实景三维中国建设等国家重大需求不可或缺的关键支撑^[1]。DEM 主要借助空间插值方法对离散采样点插值获得。然而, 由于地球表面的复杂性和多态性, 经典插值方法以曲面连续或光滑性为基本假设会受到陡坎、冲沟、梯田等断裂地形特征的影响^[2], 导致断裂线周围的高程被平滑, 进而使得构建的 DEM 失真。因此, 如何保持断裂地形特征是实现高质量 DEM 建模的难题和关键。

针对上述问题, 国内外学者提出多种建模算法, 大致可以归纳为两种^[3]。第一种是利用已知的断裂线作为约束条件辅助 DEM 内插。例如, 文献[4]提出了一种两步约束 Delaunay 三角网法, 该方法通过嵌入点和断裂线来逐步细分 Delaunay 三角网, 进而构建高精度 DEM。文献[5]通过对方向导数的使用将断裂线结合到多分辨率薄板样条曲面拟合中, 进而构造出

具有断裂地形特征的高质量 DEM。文献[6]将等高线和已知断裂线作为 ANUDEM 方法的输入数据,进而构建高分辨率 DEM。然而,目前仍缺乏有效且自动化的技术手段从点云数据中提取精准的地形断裂线,且过程中依赖较高的人工干预^[7],导致该类方法实用性不高。

第二种是在无断裂线约束下有效捕捉断裂地形空间分布特征,进而将地面点云插值成 DEM^[8]。因此,该类方法的关键是如何更好地感知地形特征空间分布,进而减弱待插值点异侧采样点对计算结果的影响。为此,文献[9]提出了一种适用于 DEM 构建的点云特征保持降噪算法,通过判断断裂线两侧法向量的差异合理分配采样点的权重。该方法在保持山脊、山谷等折痕断裂地形方面表现出较好的能力,然而其在保持诸如断崖、梯田等跳跃式断裂地形方面效果不佳。文献[10]发展了一种顾及结构张量的加权径向基函数方法,该方法将结构张量集成到径向基函数中,充分利用了断裂线附近采样点的梯度和方向信息,实现了各种地形特征的高质量 DEM 建模。然而,该方法受法向量精度影响显著,而且容易丢失高程突变较大的断裂地形特征。

针对上述问题,本文提出了一种顾及空间异质性的多元径向基函数插值方法。相比传统插值算法,本文方法的主要贡献为提出了一种耦合距离、高差、法向量三种地形特征信息的多元径向基核函数,减弱了待插值点异侧的采样点对插值结果影响,对山脊、山谷等折痕断裂地形以及断崖、梯田等跳跃断裂地形都具有较强的保持能力。

1 算法原理

针对传统插值方法以地面光滑性为基本假设导致断裂线周围的高程被平滑进而使得 DEM 失真问题,本文充分考虑影响断裂线同异侧采样点权重分配差异,提出了一种顾及空间异质性的多元径向基函数插值方法,主要包括多元 RBF 插值以及迭代计算两大过程。

1.1 多元 RBF 插值

假设待插值点 y , 点云邻域内有 m 个邻近已知点 $\{y_i, f(y_i)\}_{i=1}^m$ 用于插值计算,则 RBF 计算表达式为:

$$f(y) = \sum_{i=1}^m \lambda_i \varphi + \sum b_i p_k(y) \quad (1)$$

式中, φ 和 λ 分别是 RBF 核函数和权重, $p_k(y)$ 和 b 分别是多项式函数和对应的系数。本文中利用 *kd-tree*(*k-dimensional*) 索引算法搜索距离待插值点最近的 m 个邻近已知点(本文取 $m=12$)。

式(1)的矩阵形式可以表示为:

$$f = \Phi\lambda + Pb \quad (2)$$

式中, $f = [f_1 \cdots f_n]^T$; $\lambda = [\lambda_1 \cdots \lambda_n]^T$; $b = [b_1 \cdots b_n]^T$; $\Phi = \begin{bmatrix} \varphi_{11} & \cdots & \varphi_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \varphi_{n1} & \cdots & \varphi_{nn} \end{bmatrix}$;

$$P = \begin{bmatrix} 1 & x_1^T \\ \vdots & \vdots \\ 1 & x_n^T \end{bmatrix}。$$

根据性质的差异,断裂线可分为跳跃断裂线和折痕断裂线两种^[11]。当待插值点位于跳跃断裂线(例如悬崖、路沿)周围时(图 1a),其邻域点高程变化剧烈;同理,当待插值点位于折痕断裂线(例如谷、脊)周围时(图 1b),其邻域内存在较大的法向量突变。因此,如果将这些邻域点全部用于待插点计算,容易导致 DEM 失真。

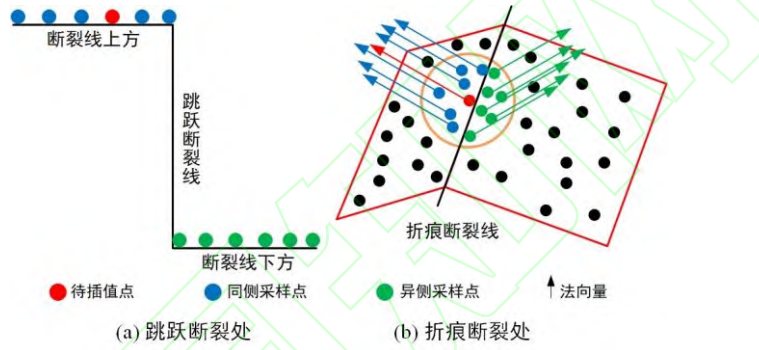


图 1 断裂地形处的点云分布

Fig.1 Distribution of point clouds at breaklines

针对上述问题,本文通过耦合距离、高差、法向量三种地形信息,构建了一种顾及地形特征的多元 RBF 核函数,其表达式为:

$$\Phi = \Phi(d_{ij}) \times \Phi(h_{ij}) \times \Phi(n_{ij}) \quad (3)$$

式中, $\Phi(d_{ij})$ 、 $\Phi(h_{ij})$ 、 $\Phi(n_{ij})$ 分别表示距离、高差、法向量核函数,计算公式分别为:

$$\Phi(d_{ij}) = \exp(-d_{ij}^2 / 2\sigma_d^2) \quad (4)$$

式中, d_{ij} 为待插值点与邻近采样点的欧氏距离, σ_d 为核函数核半径,用于调控基函数的平滑程度^[12]。本文利用文献[13]中提出的公式来确定核半径 σ_d ,其表达式为:

$$\sigma_d = \text{median}_{i \in A} \left(\min_{j \in B} \|d_{ij}\| \right) \quad (5)$$

式中, A 表示待插值点的训练集合, B 表示已知采样点的训练集合; *median* 表示取中值运算; *min* 取最小值运算。式(4)表明,距离待插值点越近的采样点,分配的权重越大,进而对插值的影响越大,反之,则越小。

$$\Phi(h_{ij}) = \exp[-(h_i - h_j)^2 / 2\sigma_h^2] \quad (6)$$

式中, h_i 为第 i 个待插值点的高程值, h_j 为第 j 个邻近采样点的高程值, σ_h 为核函数核半径, 用于调控基函数的平滑程度。 σ_h 的计算公式为:

$$\sigma_h = \text{median} \left(\min_{j \in B} \|h_i - h_j\| \right) \quad (7)$$

式 (6) 表明, 邻近采样点分配的权重与其和待插值点的高程差成反比, 即邻近采样点与待插值点高程差异越大, 则该点分配的权重越小, 反之, 则越大。一般情况下, 点云邻域内位于特征线异侧的采样点与其高程相差较大 (图 1a)。

$$\Phi(n_{ij}) = \exp[-(1 - \mathbf{n}_i \cdot \mathbf{n}_j)^2 / 2\sigma_n^2] \quad (8)$$

$$\mathbf{n}_i \cdot \mathbf{n}_j = |\mathbf{n}_i| \times |\mathbf{n}_j| \times \cos\theta \quad (0 \leq \theta \leq \pi) \quad (9)$$

式中, \mathbf{n}_i 为第 i 个待插值点的法向量, \mathbf{n}_j 为第 j 个邻近采样点的法向量, θ 为待插值点与邻近采样点的法向量夹角, σ_n 为核函数核半径, 用于调控基函数的平滑程度。本文令

$$\sigma_n = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \mathbf{n}_i \cdot \mathbf{n}_j \quad (10)$$

式中, k 为待插值点的总个数。式 (8) 表明, 采样点的法向量与待插值点的法向量形成的夹角越大, 则分配的权重越小, 反之, 则越大。一般情况下, 点云邻域内位于特征线同侧的采样点与其夹角较小, 异侧较大 (图 1b)。

由式 (8) 可见, 点云法向量估计的精准性直接影响最终插值精度。常规的法向量估计方法将点云邻域视为光滑曲面, 对点云邻域内的点赋予等同权重进行法向量估计, 而忽略了断裂地形等特殊条件下点云分布各向异性的影响, 从而导致在地形特征处法向量计算不准确^[14] (图 2a)。为此, 本文采用文献[15]中提出的基于 M-估计器的迭代加权 PCA 法, 通过双重自动初始化以解决断裂地形特征附近的各向异性问题, 进而提升不同地形特征处法向量估计的准确性 (图 2b)。

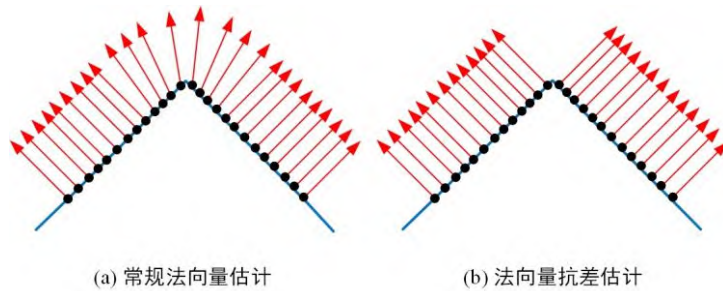


图 2 法向量估计

Fig.2 Normal estimation

本文提出的多元核函数是一种非线性核函数，其通过耦合采样点和待插点的空间距离、高程差以及法向量夹角来定义邻近点对插值点的贡献。例如，在光滑连续的平坦区域，点云邻域内点之间的高程和法向量均相差不大，此时多元核函数近似于普通高斯核函数运算结果。当待插点处于断崖、梯田等跳跃断裂地形周围时，高程变化剧烈，而法向量变化不大，此时多元核函数可看作耦合距离和高程的核函数。同理，在山脊、山谷等折痕断裂地形区域时，法向量发生急剧突变，而高程仍具有连续性，此时多元核函数可看作耦合距离和法向量的核函数。因此，改进的多元核函数对各种地形特征均具有较好的普适性。

1.2 迭代插值

为实现高精度 DEM 建模，本文采用一种多元径向基函数逐步更新策略求算待插点高程（图 3）。具体而言，首先采用最近邻插值法对待插点的高程进行初始化，其次计算待插点和邻域采样点的空间距离、高差，以及每个待插点和采样点的法向量，然后根据空间距离、高差和法向量夹角构建多元径向基函数进而对待插点计算。然而，由于待插点初始值的不准确性导致法向量估计出现偏差，进而使得插值结果不准确。为此，本文对上述过程（即高差计算、法向量估计、插值计算）反复迭代进行直至插值结果趋于稳定，如相邻两次迭代（第 i 和 $i-1$ 次）获取的 DEM 差值的最大值小于设定的阈值（ tol ），即 $\max(DEM^i - DEM^{i-1}) < tol$ 。经过多次实验分析表明阈值（ tol ）取 0.005 m 比较合理。

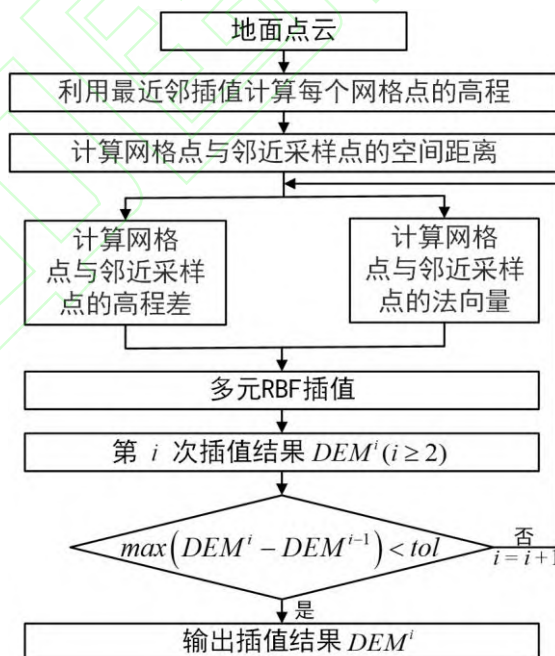


图 3 迭代插值流程图

Fig.3 Flow chart of iterated interpolation

2 实验数据与方法

2.1 实验数据

本研究首先选取 10 组由国际摄影测量与遥感协会 (ISPRS) 提供的机载 LiDAR 点云基准数据集为研究对象。该数据集包括丰富的地形特征,能够对本文提出的算法进行全面的精度验证。对于每组公共数据集,本文将其随机划分为训练数据和检核数据,90%的训练数据用于模型构建,10%的检核数据用于评定模型精度。表 1 详细地列出了 10 组数据集的统计信息。

表 1 数据集的统计信息

Tab. 1 Statistical information of the datasets

样区	训练点数	检核点数	测区面积/ha	点云密度 pts/m ²	高程标准差/m	平均高程/m
s11	19607	2179	4.053	2.103	29.22	355.9
s21	9076	1009	1.431	2.521	0.81	289.8
s22	20253	2251	3.404	2.442	2.81	294.3
s23	11901	1322	3.011	1.691	5.72	298.3
s24	4891	543	0.892	2.102	5.25	298.1
s31	14000	1556	2.826	1.781	0.73	311.1
s41	5041	561	1.751	3.844	3.51	298.7
s51	12555	395	9.992	0.343	15.20	270.5
s53	29690	3207	20.401	0.391	17.01	286.6
s61	30468	3386	22.392	0.422	7.13	303.1

此外,本文还从新西兰惠灵顿市选择了一组复杂地表断层点云数据作为研究对象,该数据集具有明显的断裂特征,可以检验各种插值方法对地形特征的保持能力。该研究区域面积为 25 ha,平均坡度为 17.4°。为了保证实验数据的质量,本文通过 Terrascan 软件获取初始滤波结果,然后再通过手动检核的方式剔除错误分类点。最终获得了测区内地面点共 384906 个,该地面点高程范围为[101.6, 211.2 m],高程标准差为 22.8 m,平均点间距为 0.48 m。

2.2 评价指标

为了验证本文方法的高效性,将其计算结果与文献[10]提出的结构张量约束的 RBF 方法 (Structure Tensor-based Radial Basis Function, ST-RBF) 以及 3 种经典插值方法 (包括 TIN、ANUDEM、标准 RBF) 精度比较。其中,各个方法的最优参数均通过交叉验证方式获取^[16]。选择的精度指标包括中误差 (RMSE) 和平均绝对误差 (MAE),计算公式分别为:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Z_i - Z_i^*)^2}{n}} \quad (11)$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |Z_i - Z_i^*| \quad (12)$$

式中： Z_i^* 是已知采样点 i 的预测值， Z_i 是采样点 i 的参考值， n 是检核点数。

3 结果分析

3.1 ISPRS 数据

对 ISPRS 数据计算结果表明（表 2），所有方法分别在 s53 和 s31 精度最低和最高，主要原因为 s53 的地表粗糙且点云密度小，而 s31 的地表平坦（表 1）。此外，除 s21 外（该组数据多为平坦地区），新方法生成的 DEM 精度均优于其他 4 种方法。

表 2 各插值方法处理 10 组 ISPRS 数据时的 RMSE 和 MAE (m)

Tab. 2 RMSE, MAE of the proposed and other methods when applied to the ISPRS samples (m)

精度指标	方法	s-11	s-21	s-22	s-23	s-24	s-31	s-41	s-51	s-53	s-61	Average
RMSE	TIN	0.633	0.063	0.165	0.458	0.576	0.065	0.395	0.153	1.285	0.235	0.403
	ANUDEM	0.604	0.070	0.240	0.402	0.506	0.065	0.549	0.131	1.442	0.241	0.425
	RBF	0.555	0.141	0.182	0.472	0.495	0.065	0.350	0.141	1.338	0.261	0.400
	ST-RBF	0.550	0.067	0.164	0.380	0.482	0.065	0.314	0.145	1.246	0.220	0.363
	本文方法	0.550	0.070	0.160	0.375	0.480	0.065	0.262	0.130	1.114	0.211	0.341
MAE	TIN	0.342	0.075	0.095	0.223	0.172	0.048	0.117	0.114	0.393	0.126	0.171
	ANUDEM	0.348	0.075	0.096	0.170	0.177	0.055	0.142	0.103	0.416	0.134	0.172
	RBF	0.339	0.074	0.090	0.191	0.182	0.045	0.112	0.112	0.430	0.129	0.170
	ST-RBF	0.307	0.050	0.077	0.148	0.155	0.045	0.103	0.093	0.307	0.101	0.139
	本文方法	0.265	0.056	0.069	0.141	0.148	0.044	0.081	0.085	0.303	0.095	0.129

表 2 还显示了新方法与其他 4 种方法在处理 10 组 ISPRS 数据时的平均 RMSE 和 MAE。从中可以发现，两种精度指标下，ANUDEM 表现最差，这主要是因为 ANUDEM 在插值过程中采用了全局平滑性假设^[17]。相比之下，本文提出的算法取得了最小的平均 RMSE (0.341 m) 及 MAE (0.129 m)，具体来说，本文方法的平均 RMSE 比经典的插值方法 TIN、ANUDEM、RBF 分别降低了 15.4%、19.8%、14.8%，平均 MAE 分别降低了 24.6%、25.0%、24.1%。相较于 ST-RBF，新方法的平均 RMSE 降低了 6.1%，平均 MAE 降低了 7.2%。本文方法较高插值精度主要是因为是在插值过程中考虑了诸如断裂线等不连续地形特征的空间异质性。

图 4 展示了 5 种方法对 s23 插值后的 DEM 山体阴影图。结果表明，TIN 存在大量的地形特征缺失，而且还出现了明显的峰值削平（图 4a 圆形标识）。5 种方法中，ANUDEM 的可视化效果最差，表面异常平滑且存在大量不规则凸起（图 4b）。经典插值中，RBF 的地形细节保持较好，但存在不合理的伪凹坑（图 4d 圆形标识）。相较于经典的插值方法，ST-RBF（图 4d）在整体插值效果上有明显的提升，然而在突变程度较大的断裂地形处不如本文插值方法（图 4e）。

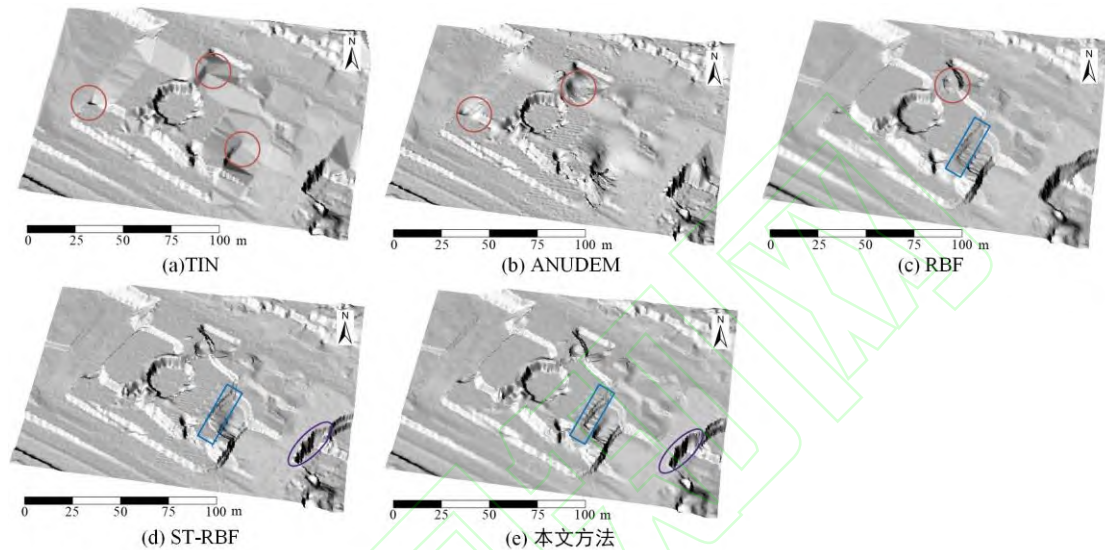


图 4 各插值方法生成的 3D 山体阴影图

Fig.4 3D Hillshades of the proposed and other interpolation methods on s23

3.2 地表断层数据

为了验证各插值方法在不同坡度下的精度，本文根据自然断点分级法^[18]将坡度分为 6 类（ 0° - 15° 、 15° - 22° 、 22° - 29° 、 29° - 36° 、 36° - 45° 、 $>45^{\circ}$ ），然后利用各方法分别插值。结果表明（图 5），各插值方法的精度均随地形坡度的上升而线性下降。因此，插值误差与坡度呈负相关。此外，从图 5 还可以看出，各种插值方法在不同坡度等级下具有不同表现。但整体而言，本文方法的插值精度最优，其次是 ST-RBF，经典插值方法精度最差。其中，当坡度 $>29^{\circ}$ 时，本文方法相较于经典插值方法提升尤为明显，这主要归因于本文方法充分考虑了采样点和待插值点之间的空间相关性以及地形特征异质性。

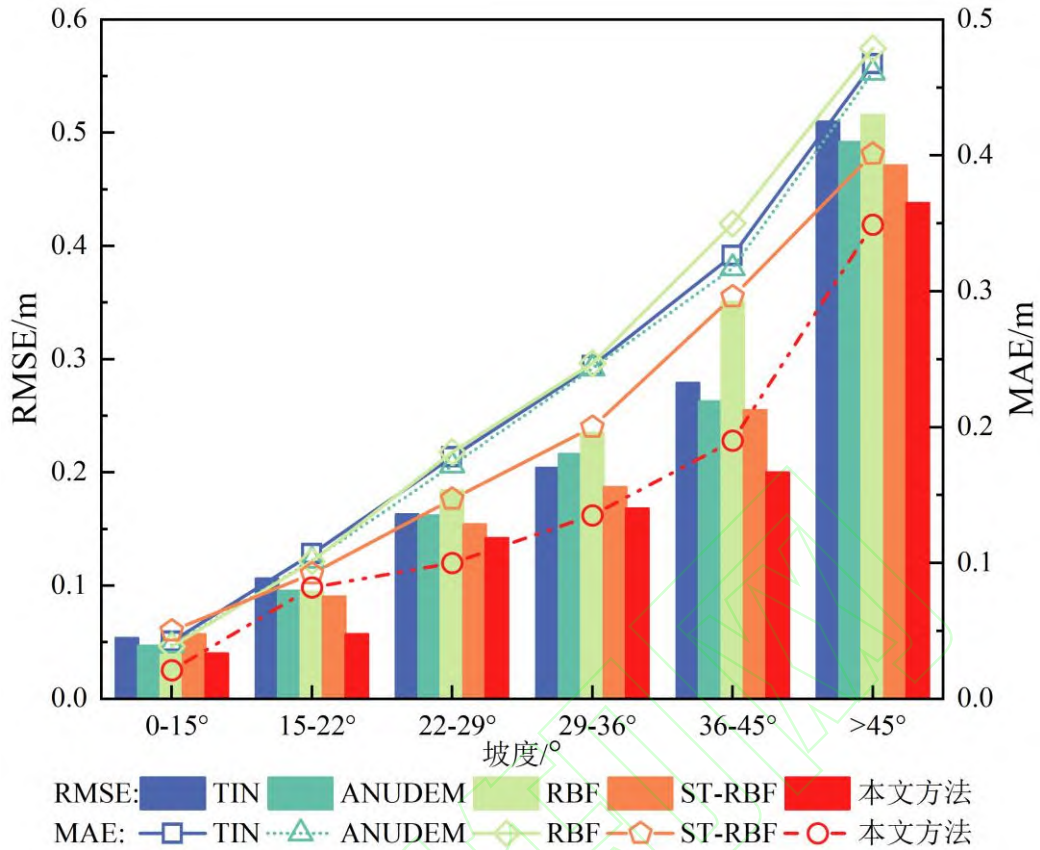


图 5 不同坡度下各方法的 RMSE 和 MAE 对比

Fig.5 Comparison of RMSEs and MAEs of DEM constructed by each method at different terrain slopes

此外,为了检验各插值 DEM 在实际应用中的优劣,本文对各插值 DEM 生成的等高线、坡度、地形特征线 3 个派生因子进行了对比分析。

如图 6 所示,通过等高线对比可以看出,TIN 在山脊处的等高线存在断开现象(如图 6a 椭圆标识);ANUDEM(图 6b)和 RBF(图 6c)中等高线走势紊乱,局部表达有较大误差,RBF 尤为突出,甚至有丢失山头现象(如图 6c 方形标识);ST-RBF(图 6e)中等高线走势连贯,但局部微地貌的保持不如本文方法(图 6e)。相比较而言,本文插值方法生成的等高线表达清晰且较为光滑。

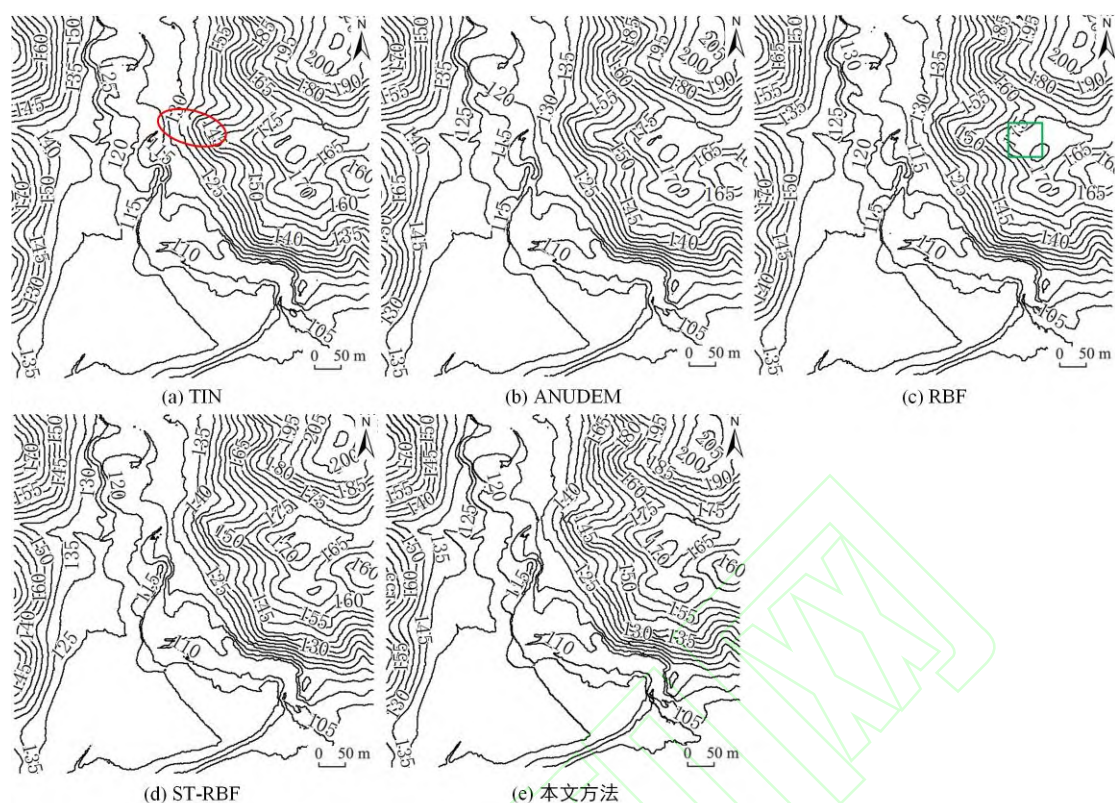


图 6 各插值 DEM 生成的等高线

Fig.6 Contours generated by each interpolated DEM

由各插值 DEM 生成的坡度对比图（图 7）可知，当坡度 $<20^\circ$ 时，各坡度图具有相似的空间分布。但当坡度 $>20^\circ$ 时，其存在较大差异。其中，传统插值方法生成的坡度存在过度平滑现象，导致其难以表达坡度的细微变化。相比之下，ST-RBF 与本文方法生成的坡度表面纹理丰富，且各坡度范围分布自然清晰，但 ST-RBF 局部区域存在伪地形现象（图 7d 中圆形标识）。

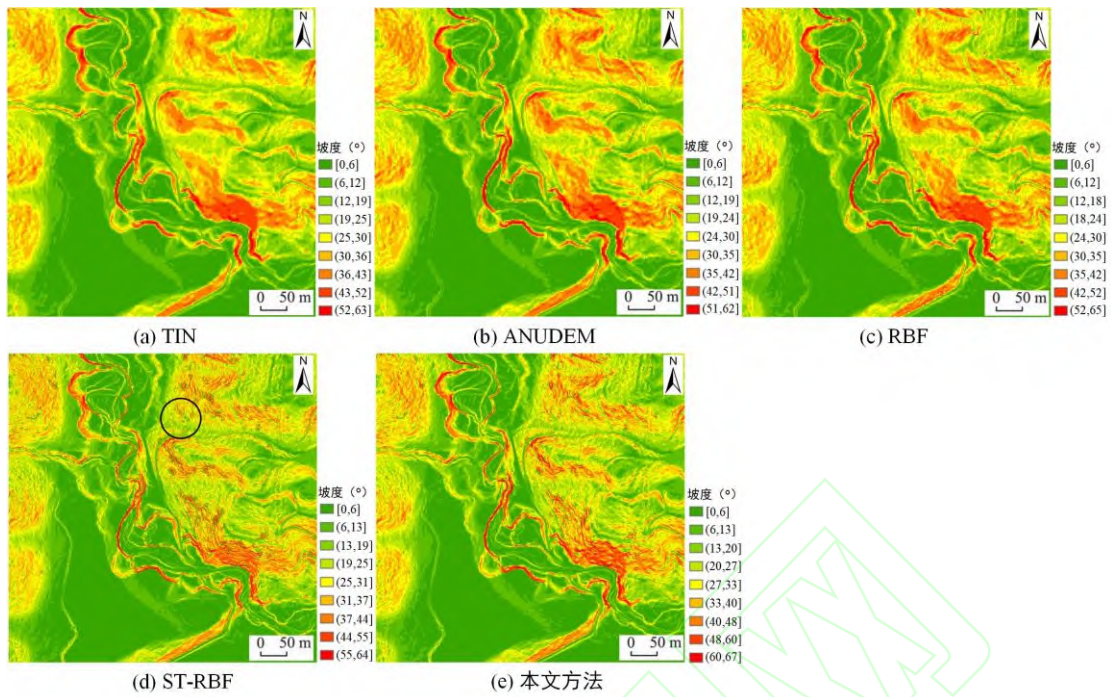


图 7 各插值 DEM 生成的坡度对比

Fig.7 Slope generated by each interpolation DEM

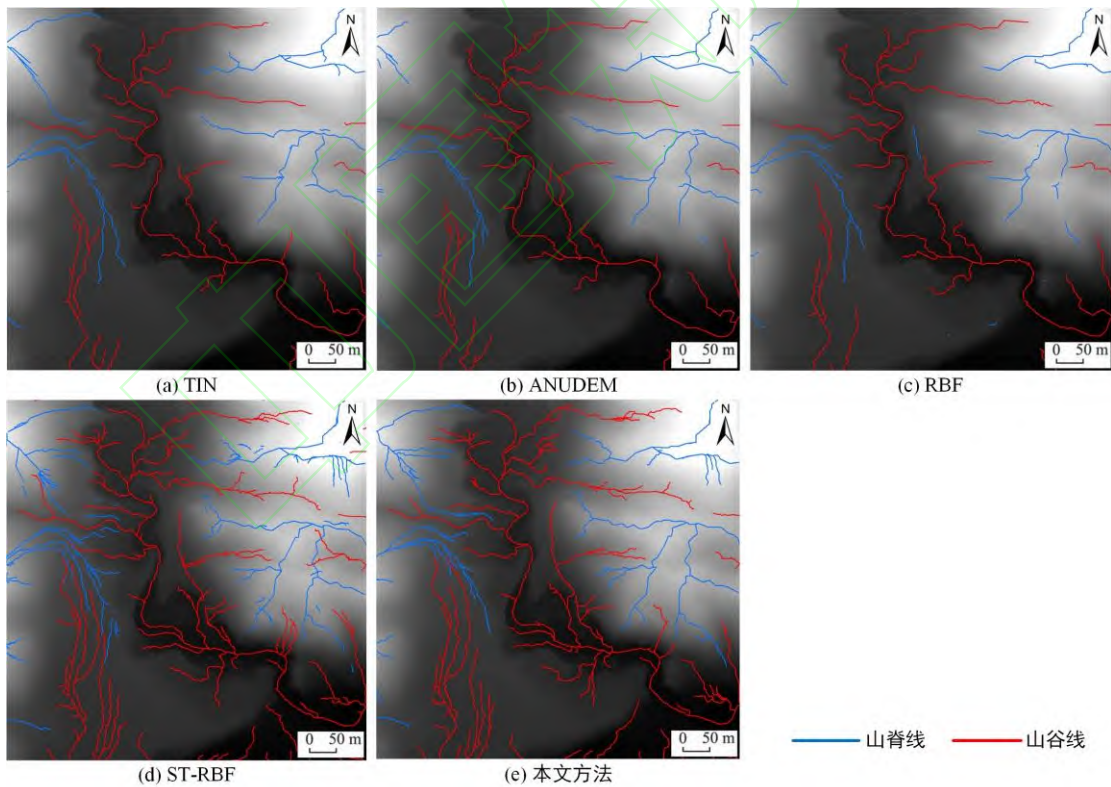


图 8 各插值 DEM 生成的山脊线、山谷线

Fig.8 Ridge lines and Valley lines generated by each interpolated DEM

各插值 DEM 生成的山脊、山谷线如图 8 所示。结果表明，TIN（图 8a）与 ANUDEM（图 8b）中地形特征线整体走势流畅，但丢失了较多局部细节。RBF（图 8c）效果最差且

出现较多特征线断开现象。ST-RBF（图 8d）生成的地形特征线较为详细，但存在许多伪特征线。相比之下，本文方法（图 8e）生成的特征线连续性最优，且更加符合实际地形特征。

4 结论

针对现有插值算法在诸如断裂线等不连续地形特征处插值精度不高的难题，本文提出了一种顾及空间异质性的多元径向基函数插值方法。该方法通过耦合距离、高差、法向量三种地形信息，减弱了断裂地形中异侧采样点对插值的影响，实现了对山脊、山谷等折痕断裂线以及断崖、梯田等跳跃断裂线的保持。借助 10 组 ISPRS 提供的公共数据以及 1 组地表断层机载激光雷达点云数据，将本文方法与其他 4 种插值方法（TIN、ANUDEM、标准 RBF、ST-RBF）对比表明，本文算法精度最高，平均 RMSE 比经典插值算法至少降低了 14.8%，平均 MAE 至少降低了 24.1%。此外，本文方法在地形细节和断裂处的保持等方面都明显优于其他 4 种方法。

参考文献

- [1] YANG Bisheng, HAN Xu, DONG Zhen. A deep learning network for semantic labeling of large-scale urban point clouds [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2021, 50(8): 1059–1067. (杨必胜, 韩旭, 董震. 适用于城市场景大规模点云语义标识的深度学习网络[J]. *测绘学报*, 2021, 50(8): 1059–1067.)
- [2] Chen C, Wu H, Yang Z, Li Y. Adaptive coarse-to-fine clustering and terrain feature-aware-based method for reducing LiDAR terrain point clouds[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2023, 200: 89–105.
- [3] Chen C, Chang B, Li Y, Shi B. Filtering airborne LiDAR point clouds based on a scale-irrelevant and terrain-adaptive approach[J]. *Measurement*, 2021, 171: 108756.
- [4] De Floriani L, Puppo E. An on-line algorithm for constrained Delaunay triangulation[J]. *CVGIP: Graphical Models and Image Processing*, 1992, 54(4): 290–300.
- [5] Hingee K L, Caccetta P, Caccetta L. Modelling discontinuous terrain from DSMs using segment labelling, outlier removal and thin-plate splines[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2019, 155: 159–171.
- [6] Zheng X, Xiong H, Yue L, Gong J. An improved ANUDEM method combining topographic correction and DEM interpolation[J]. *Geocarto International*, 2016, 31(5): 492–505.
- [7] Yang B, Huang R, Dong Z, Zang Y, Li J. Two-step adaptive extraction method for ground points and breaklines from lidar point clouds[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2016, 119: 373–389.
- [8] CHEN Chuanfa, WANG Mengying, YANG Shuai, WANG Zhen. A multi-resolution hierarchical interpolation-based filtering method for airborne LiDAR point clouds in forest areas [J]. *Journal of Shandong University of Science and*

- Technology(Natural Science), 2021, 40(2): 12–20.(陈传法, 王梦樱, 杨帅, 王珍. 适用于林区机载 LiDAR 点云的多分辨率层次插值滤波方法[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2021, 40(2): 12–20.)
- [9] Chen C, Gao Y, Li Y. A feature-preserving point cloud denoising algorithm for LiDAR-derived DEM construction[J]. *Survey Review*, 2021, 53(377): 146–157.
- [10]Chen C, Gao Y, Li Y, Bei Y. Structure tensor-based interpolation for the derivation of accurate digital elevation models[J]. *CATENA*, 2022, 208: 105733.
- [11]GAO Yuan, ZHU Yanan, CHEN Chuanfa, HU Zhanzhan, HU Baojian. A Weighted Radial Basis Function Interpolation Method for High Accuracy DEM Modeling[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2023, 48(8): 1373-1379.(高原, 朱娅男, 陈传法, 胡占占, 胡保健. 高精度DEM建模的加权径向基函数插值方法[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2023, 48(8): 1373-1379.)
- [12]Buhmann M D. Radial basis functions[J]. *Acta Numerica*, 2000, 9: 1–38.
- [13]ZHANG Xiang; XIAO Xiaoling; Xu Guangyou. A New Method for Determining the Parameter of Gaussian Kernel[J]. *Computer Engineering*, 2007, 33(12): 52-53,56. (张翔,肖小玲,徐光祐.一种确定高斯核模型参数的新方法[J].计算机工程,2007(12):52-53,56.)
- [14]MA Weifeng, WANG Jinliang, ZHANG Jianpeng ,et al.Feature extraction from point cloud based on improved normal vector. [J].*Science of Surveying and Mapping*, 2021, 46(11): 84-90+146.(麻卫峰, 王金亮, 张建鹏, 麻源源, 张忠伟. 一种改进法向量估算的点云特征提取[J]. 测绘科学, 2021, 46(11): 84-90+146.)
- [15]Sanchez J, Denis F, Coeurjolly D, Dupont F, Trassoudaine L, Checchin P. Robust normal vector estimation in 3D point clouds through iterative principal component analysis[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2020, 163: 18–35.
- [16]Bergmeir C, Benítez J M. On the use of cross-validation for time series predictor evaluation[J]. *Information Sciences*, 2012, 191: 192–213.
- [17]Arun P V. A comparative analysis of different DEM interpolation methods[J]. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 2013, 16(2): 133–139.
- [18]Tang G A, Song J. Comparison of slope classification methods in slope mapping from DEMs[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*,2006,20(2):157-160,192. (汤国安, 宋佳. 基于DEM坡度图制图中坡度分级方法的比较研究[J]. 水土保持学报, 2006(2): 157-160,192.)

网络首发:

标题: 顾及空间异质性的断裂地形区高精度 DEM 建模方法

作者: 王兴杰, 陈东兴, 陈传法, 徐联中, 洪壮壮

Doi: 10.13203/j.whugis20230364

收稿日期: 2024-05-27

引用格式:

王兴杰, 陈东兴, 陈传法, 等. 顾及空间异质性的断裂地形区高精度 DEM 建模方法[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2024, Doi:10.13203/j.whugis20230364. (WANG Xingjie, CHEN Dongxing, CHEN Chuanfa, et al. A High Accuracy DEM Interpolation Method Considering the Heterogeneous Distribution of Elevations in Areas with Breaklines[J] *Geomatics and Information*

网络首发文章内容和格式与正式出版会有细微差别，请以正式出版文件为准！

您感兴趣的其他相关论文：

高精度 DEM 建模的加权径向基函数插值方法

高原, 朱娅男, 陈传法, 胡占占, 胡保健

武汉大学学报(信息科学版), 2023, 48(8): 1373-1379.

<http://ch.whu.edu.cn/cn/article/doi/10.13203/j.whugis20210100>

一种综合考虑采样点水平和高程误差的 DEM 建模算法

陈传法, 闫长青, 刘凤英, 赵娜, 刘国林

武汉大学学报(信息科学版), 2018, 43(5): 739-744.

<http://ch.whu.edu.cn/cn/article/doi/10.13203/j.whugis20150695>

全球高分辨率数字高程模型研究进展与展望

李振洪, 李鹏, 丁咚, 王厚杰

武汉大学学报(信息科学版), 2018, 43(12): 1927-1942.

<http://ch.whu.edu.cn/cn/article/doi/10.13203/j.whugis20180295>