引文格式: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),2025,50(11):2303-2310.DOI:10.13203/j.whugis20230364

Citation: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,2025,50(11):2303-2310.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,提出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3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。以国际摄影测量与遥感协会提供的10组公共数据和1组机载激光雷达点云数据为研究对象,将所提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、不规则三角网法、ANUDEM法(Australian National University DEM))进行比较,结果表明,所提方法的平均总误差最小,插值性能最优,而且还能较好地保持断裂地形特征。

关键词:径向基函数插值;断裂线;多元核函数;空间异质性

中图分类号:P208 **文献标识码**:A **收稿日期**:2024-08-27

DOI:10.13203/j.whugis20230364 **文章编号**:1671-8860(2025)11-2303-08

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

WANG Xingjie[1] *CHEN Dongxing*[2] *CHEN Chuanfa*[1] *XU Lianzhong*[1] *HONG Zhuangzhuang*[1]

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 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**: 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 international society for photogrammetry and remote sensing and 1 airborne light detection and ranging 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, triangulated irregular network, Australian National University DEM. Results show that the

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@lreis.ac.cn

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,高分辨率和高精度数字高程模型(digital elevation model,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(Australian National University DEM)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]。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,本文方法主要提出了一种耦合距离、高差、法向量3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的影响,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(radial basis function,RBF)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:

$$f(y)=\sum_{i=1}^{m}\lambda_i\varphi+\sum_{j=1}^{s}b_j p_k(y) \tag{1}$$

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;s表示多项式的阶数,本文s取1。本文利用kd-tree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:

$$\boldsymbol{f}=\boldsymbol{\Phi\lambda}+\boldsymbol{Pb} \tag{2}$$

式中,$\boldsymbol{f}=\begin{bmatrix}f_1 & f_2 & \cdots & f_m\end{bmatrix}^{\mathrm{T}}$;$\boldsymbol{\Phi}=\begin{bmatrix}\varphi_{11} & \cdots & \varphi_{1m}\\ \vdots & \ddots & \vdots\\ \varphi_{m1} & \cdots & \varphi_{mm}\end{bmatrix}$;$\boldsymbol{P}=\begin{bmatrix}p_{11} & \cdots & p_{1s}\\ \vdots & \ddots & \vdots\\ p_{m1} & \cdots & p_{ms}\end{bmatrix}$;$\boldsymbol{\lambda}=\begin{bmatrix}\lambda_1 & \lambda_2 & \cdots & \lambda_m\end{bmatrix}^{\mathrm{T}}$;$\boldsymbol{b}=\begin{bmatrix}b_1 & b_2 & \cdots & b_s\end{bmatrix}^{\mathrm{T}}$。

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 1(a)),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 1(b)),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。

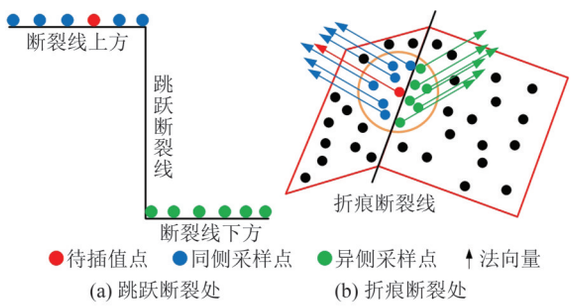


图 1　断裂地形处的点云分布

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 3 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:

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

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:

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

其中,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,其计算公式为:

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

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 表示取最小值运算。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。

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

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,其计算公式为:

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

式(6)表明,邻近采样点分配的权重与其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 1(a))。

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

$$\boldsymbol{n}_i\cdot\boldsymbol{n}_j=|\boldsymbol{n}_i|\times|\boldsymbol{n}_j|\times\cos\theta,0\leqslant\theta\leqslant\pi \tag{9}$$

式中,$\boldsymbol{n}_i$为第 i 个待插值点的法向量;$\boldsymbol{n}_j$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。令

$$\sigma_n=\frac{1}{k}\sum_{i=1}^{k}\boldsymbol{n}_i\cdot\boldsymbol{n}_j \tag{10}$$

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 1(b))。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 2(a))。为此,本文采用文献[15]中提出的基于 M-估计器的迭代加权主成分分析法,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 2(b))。

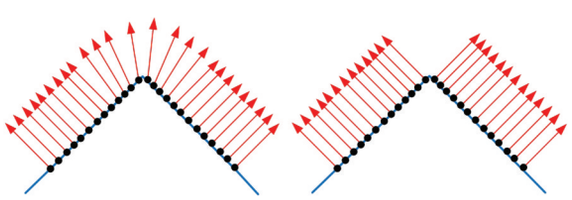


图 2　法向量估计

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RBF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值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RBF进而计算待插点。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,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(t),即$\max(\mathrm{DEM}^{i}-\mathrm{DEM}^{i-1})<t$。经过多次实验分析表明,阈值$t$取0.005 m比较合理。

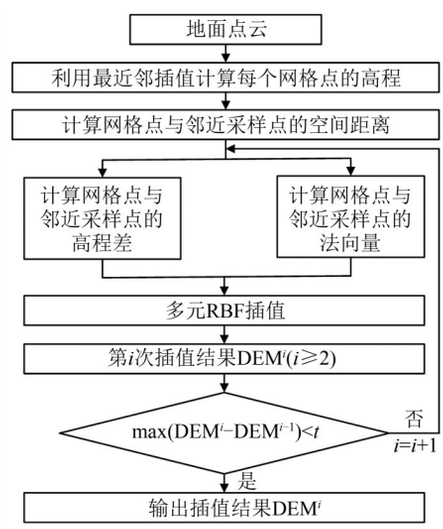


图3 迭代插值流程图

Fig. 3 Flowchart of Iterated Interpolation

2 实验数据与方法

2.1 实验数据

本文首先选取10组由国际摄影测量与遥感协会(international society for photogrammetry and remote sensing,ISPRS)提供的机载激光雷达(light detection and ranging,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,能够对本文方法进行全面的精度验证。对于每组公共数据集,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详细列出了10组数据集的统计信息。

此外,本文还从新西兰惠灵顿市选择了1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 hm^2,平均坡度为17.4°。为了保证实验数据的质量,通过Terrascan软件获取初始滤波结果,然后通过手动检核的方式剔除错误分类点,最终获得测区内地面点共384 906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。

表1 数据集的统计信息

Table 1 Statistical Information of the Datasets

样区	训练点数/个	检核点数个	测区面积/hm^2	点云密度/(点·m^{-2})	高程标准差/m	平均高程/m
s11	19 607	2 179	4.053	2.103	29.22	355.9
s21	9 076	1 009	1.431	2.521	0.81	289.8
s22	20 253	2 251	3.404	2.442	2.81	294.3
s23	11 901	1 322	3.011	1.691	5.72	298.3
s24	4 891	543	0.892	2.102	5.25	298.1
s31	14 000	1 556	2.826	1.781	0.73	311.1
s41	5 041	561	1.751	3.844	3.51	298.7
s51	12 555	395	9.992	0.343	15.20	270.5
s53	29 690	3 207	20.401	0.391	17.01	286.6
s61	30 468	3 386	22.392	0.422	7.13	303.1

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 RBF,ST-RBF)以及其他3种经典插值方法(不规则三角网法(triangulated irregular network,TIN)、ANUDEM(Australian National University DEM)、标准RBF)进行精度比较。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均方根误差(root mean square error,RMSE)和平均绝对误差(mean absolute error,MAE),计算公式分别为:

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

$$E_{\mathrm{MAE}}=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left|Z_i-Z_i^{*}\right| \tag{12}$$

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数据的计算结果表明(表2),所有方法在s53的精度最低,在s31的精度最高,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),本文方法生成的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

Table 2　RMSE and MAE of the Proposed and Other Methods when Applied to ISPRS Samples/m

精度指标	方法	s11	s21	s22	s23	s24	s31	s41	s51	s53	s61	平均
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 还显示了本文方法与其他 4 种方法在处理 10 组 ISPRS 数据时的平均 RMSE 和 MAE。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,本文方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 分别降低了约 15.4%、19.8%、14.8%,平均 MAE 分别降低了约 24.6%、25.0%、24.1%。相较于 ST-RBF,本文方法的平均 RMSE 降低了约 6.1%,平均 MAE 降低了约 7.2%。本文方法插值精度较高的原因主要是因为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 4(a)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 4(b))。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 4(c)圆形标识)。相较于经典的插值方法,ST-RBF(图 4(d))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 4(e))。

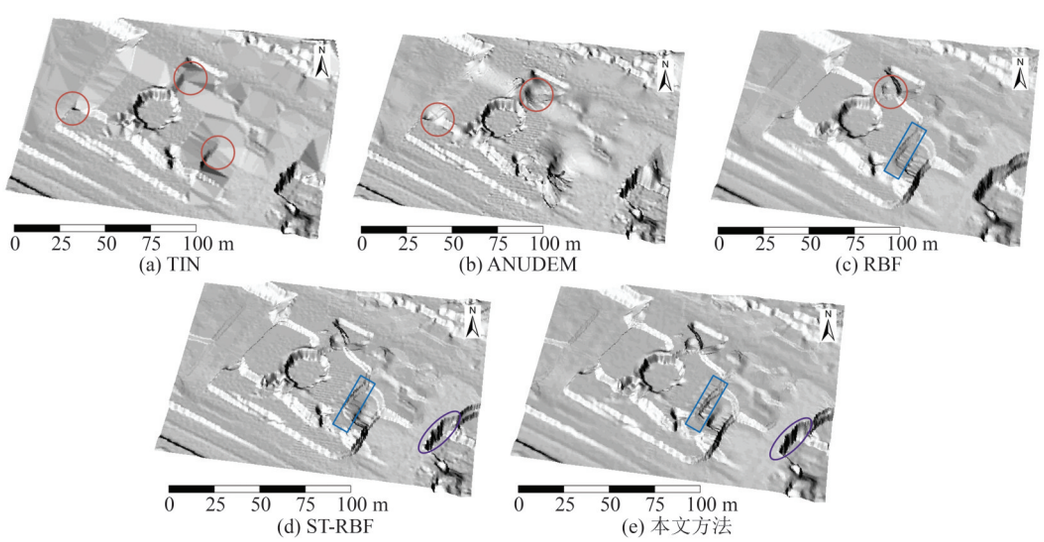


图 4　s23 样区各插值方法生成的 3D 山体阴影图

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°,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,插值精度与坡度呈负相关。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,当坡度大于29°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。

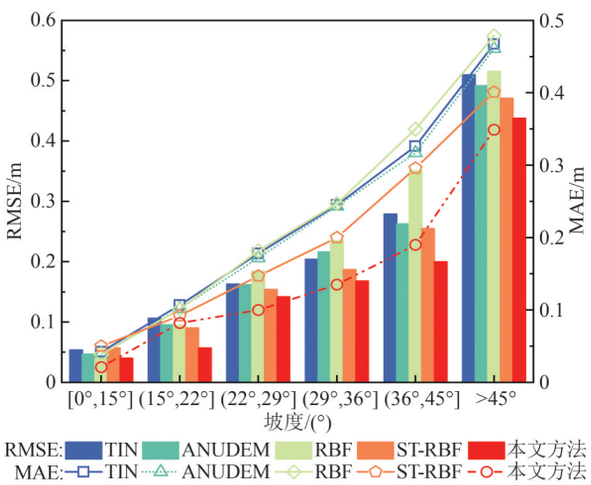


图5 不同坡度下各方法的RMSE和MAE对比

Fig. 5 Comparison of RMSE and MAE of DEM Constructed by Each Method at Different Terrain Slopes

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(图6(a)椭圆标识);ANUDEM(图6(b))和RBF(图6(c))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(图6(c)方形标识);ST-RBF(图6(d))中等高线走势连贯,但局部微地貌的保持不如本文方法(图6(e))。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。

由各插值DEM生成的坡度对比图(图7)可知,当坡度小于20°时,各坡度图具有相似的空间分布。但当坡度大于20°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7(d)中圆形标识)。

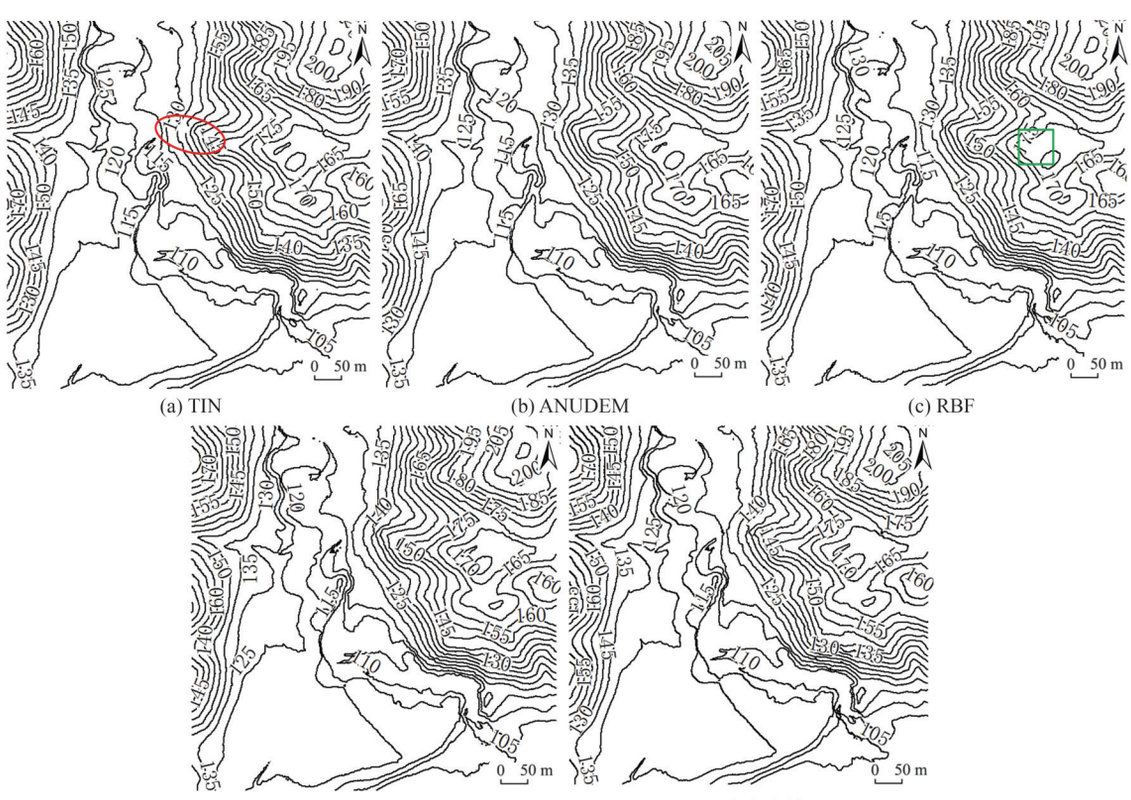


图6 各插值DEM生成的等高线

Fig. 6 Contours 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8(a))与ANUDEM(图8(b))中地形特征线整体走势流畅,但丢失了较多局部细节。RBF(图8(c))效果最差且出现较多特征线断开现象。ST-RBF(图8(d))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8(e))生成的特征线连续性最优,且更加符合实际地形特征。

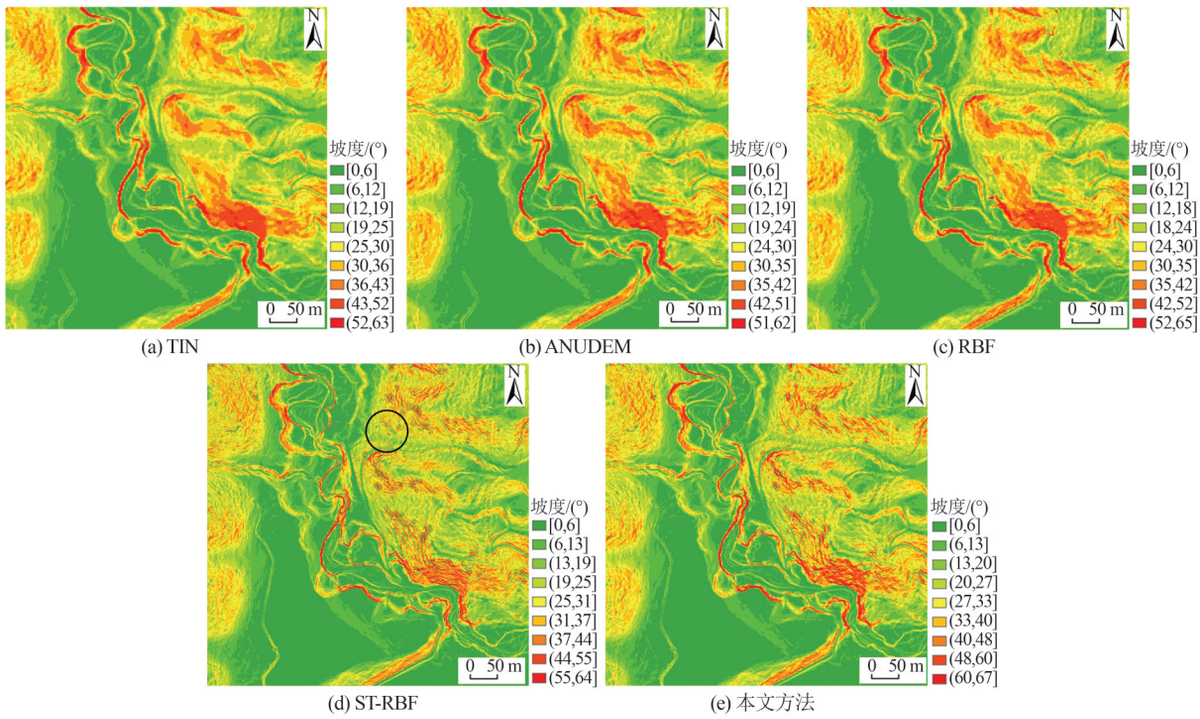


图 7　各插值 DEM 生成的坡度对比

Fig. 7　Slope Generated by Each Interpolation DEM

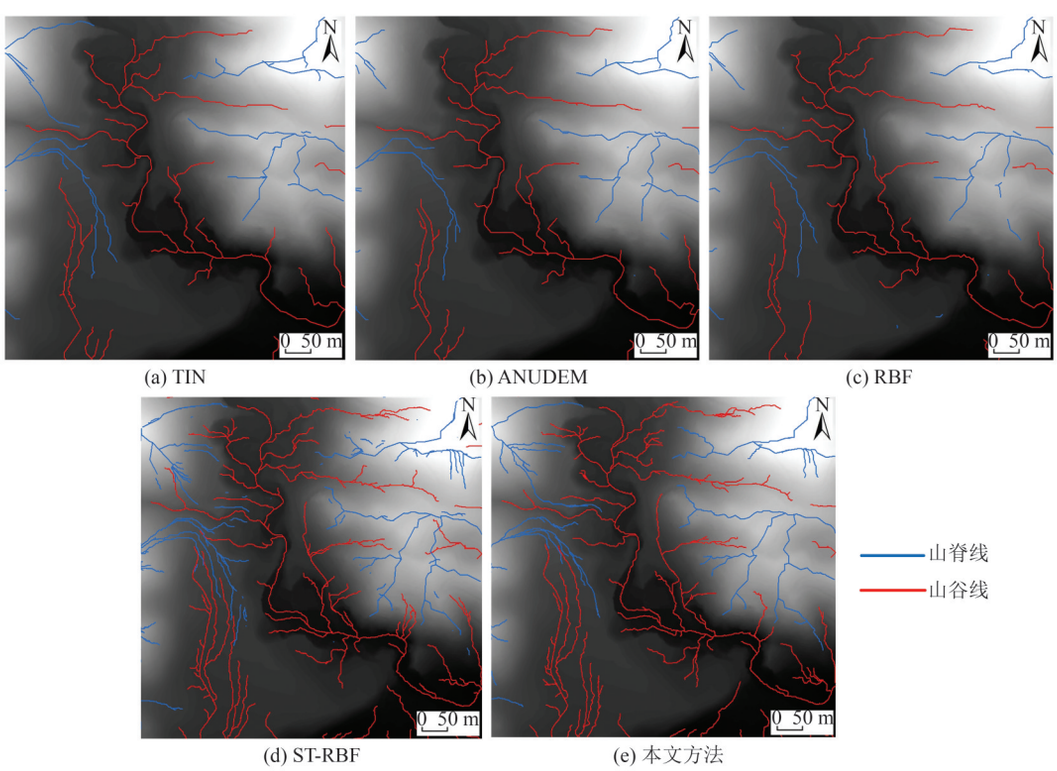


图 8　各插值 DEM 生成的山脊线、山谷线

Fig. 8　Ridge Lines and Valley Lines Generated by Each Interpolated DEM

4　结　语

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 RBF 插值方法。该方法通过耦合距离、高差、法向量 3 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 LiDAR 点云数据,将本文方法与

TIN、ANUDEM、标准RBF、ST-RBF等方法进行了对比,结果表明本文方法精度最高,平均RMSE比经典插值方法降低了约14.8%,平均MAE降低了约24.1%。此外,在地形细节和断裂处的保持等方面,本文方法都明显优于其他4种方法。

参 考 文 献

[1] 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.
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.

[2] CHEN C F, WU H M, YANG Z M, et al. 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 F, CHANG B T, LI Y Y, et al. 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 W, XIONG H J, YUE L W, et al. An Improved ANUDEM Method Combining Topographic Correction and DEM Interpolation[J]. *Geocarto International*, 2016, 31(5): 492-505.

[7] YANG B S, HUANG R G, DONG Z, et al. 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] 陈传法,王梦樱,杨帅,等. 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.
CHEN Chuanfa, WANG Mengying, YANG Shuai, et al. 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.

[9] CHEN C F, GAO Y, LI Y Y. A Feature-Preserving Point Cloud Denoising Algorithm for LiDAR-Derived DEM Construction[J]. *Survey Review*, 2021, 53(377): 146-157.

[10] CHEN C F, GAO Y, LI Y Y, et al. Structure Tensor-Based Interpolation for the Derivation of Accurate Digital Elevation Models[J]. *CATENA*, 2022, 208: 105733.

[11] 高原,朱娅男,陈传法,等. 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.
GAO Yuan, ZHU Yanan, CHEN Chuanfa, et al. 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.

[12] BUHMANN M D. Radial Basis Functions[J]. *Acta Numerica*, 2000, 9: 1-38.

[13] 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,2007,33(12):52-53.
ZHANG Xiang, XIAO Xiaoling, XU Guangyou. A New Method for Determining the Parameter of Gaussian Kernel[J]. *Computer Engineering*, 2007, 33(12): 52-53.

[14] 麻卫峰,王金亮,张建鹏,等. 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.
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.

[15] SANCHEZ J, DENIS F, COEURJOLLY D, et al. 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] 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,2006,20(2):157-160.
TANG Guo'an, SONG Jia. Comparison of Slope Classification Methods in Slope Mapping from DEMs[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2006, 20(2): 157-160.