

利用点扩散函数进行 DEM 尺度转换

刘学军¹ 王彦芳¹ 晋 蓓¹

(1 南京师范大学虚拟地理环境教育部重点实验室,南京市文苑路 1 号,210046)

摘 要:利用点扩散函数的图像模糊特性,提出了一种利用点扩散函数进行数字高程模型(digital elevation model, DEM)尺度转换的方法,即以不同尺度的点扩散函数作为模板,通过其与原始 DEM 的卷积实现不同分辨率 DEM 的尺度上推。设计了 DEM 尺度转换的评价指标,该指标包括高程统计特征、空间自相关特性及地形结构特征等。以陕北和晋中两种不同地形的 1:1 万 5 m 格网分辨率 DEM 为研究数据,对此方法进行了分析验证,并与常用的最邻近、双线性以及立方卷积等方法进行了对比。

关键词:数字高程模型;点扩散函数;尺度转换;分辨率

中图法分类号:P208

常用的格网 DEM 尺度转换模型有最邻近采样、线性插值、双线性插值、三次样条插值等 4 种^[1],这些方法也是大多数 GIS 软件所提供的重采样算法。此后,研究者们提出了多种新算法^[2-7]。然而,常用的重采样方法都存在一定的缺点^[8],小波转换又比较复杂,涉及到边界的处理^[5]、小波函数和阈值的选择^[6]等问题。

点扩散函数(point spread function, PSF)是光学系统中描述物空间和像空间在信息转移、交换与联系上的指标。在图像成像过程中,PSF 的存在是造成图像模糊、质量退化的主要原因之一^[9]。利用 PSF 的平滑模糊特性,本文提出了一种基于 PSF 的规则格网 DEM 尺度转换方法,即利用模拟不同尺度的 PSF 作为模板,通过与原始 DEM 的卷积实现 DEM 不同尺度的转换。为评价转换后 DEM 的质量特性,本文还设计了一套相应的评价指标,包括高程统计特征、空间自相关特性及地形结构特征等。

1 原理与方法

1.1 PSF

PSF 的一般形式为^[10]:

$$\text{PSF}(x, y) = \frac{1}{2\pi ab} \exp^{[-0.5(x^2/a^2 + y^2/b^2)]} \quad (1)$$

式中, a 和 b 分别表示相互垂直的两个方向的光学宽度; (x, y) 表示空间位置。实际的光学系统常常由不同的元器件如透镜、检测器、放大器等组成,因此光学系统的 PSF 实际上也是各个组成部分的 PSF 的组合,而这种组合可用一高斯函数逼近,即

$$\text{PSF}(x, y, \sigma) = K \exp\{-x^2 + y^2/2\sigma^2\} \quad (2)$$

式中, K 为系统增益,一般为 1^[11]; σ 为扩散半径。

1.2 DEM 尺度推绎

地理空间中的分辨率是尺度的一个指示器^[11],对于格网 DEM 数据来说更是如此。格网 DEM 尺度转换是将数据从一个水平分辨率转换到另一个分辨率的过程,尺度转换蕴含着变化,是格局空间分布的改变^[12]。尺度上推是从高分辨率到低分辨率的转换过程,反映地形信息的综合过程和聚集;尺度下推是从低分辨率到高分辨率的转换,实质是地形信息的再次分配和配置^[1]。本文所指的尺度转换是指从高分辨率到低分辨率的 DEM 尺度上推。

DEM 尺度上推,本质是地形信息的综合,视觉上也表现为同等视野范围内地形信息的逐渐平滑与模糊。光学系统中,信息获取与传输各环节的点扩散函数对图像产生退化作用,引起图像模糊,而图像模糊被视为一个二维点扩散函数与原始图像的卷积过程^[13]。因此,点扩散函数可以提供另一种地形综合方式,通过利用其平滑模糊

特性实现 DEM 的尺度上推。

设 DEM 分辨率为 g , 点扩散函数采用式(2), σ 为尺度转换因子, 则从分辨率为 g 的 DEM(g) 上推到分辨率为 σ 的 DEM(σ) 为:

$$DEM(\sigma) = PSF(x, y, \sigma) \otimes DEM(g) \quad (3)$$

式中, \otimes 为卷积运算符。尺度转换的过程同时也是个平滑和模糊的过程, DEM 分辨率降低, 地貌细节特征被平滑而逐渐舍去, 从而达到地形综合和尺度转换。因此式(3)的本质是通过模拟不同半径的 PSF, 利用模拟结果与原 DEM 卷积, 进而实现 DEM 尺度转换。

1.3 DEM 尺度转换评价

一般地, 尺度转换后的空间对象应该尽可能保证原始对象的统计特征。但对 DEM 而言, 还应顾及两点, 一是由于地形本身具有较强的空间自相关特性, 经过尺度转换后的 DEM 也应具有较强的空间自相关性质, 如果转换后 DEM 失去空间自相关, 则说明转换后的 DEM 损失了原来 DEM 的自相关信息, 转换后的 DEM 所表达的地形接近随机而导致无意义的尺度转换; 二是 DEM 本身蕴含丰富的地形结构信息, 而地形结构信息是地形骨架, 直接决定着地形的几何形态和基本走势, 因此转换后的 DEM 应尽可能与原 DEM 中的结构线在走势、连接等方面一致, 否则转换是无效的。

对统计特征来说, 可采用均值和标准差进行分析。由于 DEM 尺度转换的目的常常是对输入的各种模型进行综合分析, 如果转换后的 DEM 的均值发生很大变化, 则综合分析的结果可能会出现很大的误差; 同时, 许多场合下需要尺度转换过程尽可能保持原数据中的结构信息, 而数据的标准差是刻画数据结构信息的较好指标。另外, 考虑到高程数据中误差 (root mean square error, RMSE) 是目前通用的 DEM 质量标准^[14], 本文也将 RMSE 作为转换后的 DEM 评价指标之一。

DEM 空间自相关特征可采用莫兰指数 (Moran'I) 或者局域耶瑞指数 (Geary'C) 来表示, 各自定义为:

$$I = \frac{n \times \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m w_{ij} (x_i - x_m)(x_j - x_m)}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m w_{ij} \times \sum_{i=1}^n (x_i - x_m)^2} \quad (4)$$
$$C = \frac{(n-1) \times \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m w_{ij} (x_i - x_j)}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m w_{ij} \times \sum_{i=1}^n (x_i - x_m)^2}$$

式中, x_i, x_j 分别是位置 i, j 上的测量值; x_m 是所

有 i, j 位置点上测量值的均值; n 是所有测量点的数目; w_{ij} 是赋予每一个栅格测量单元的权重。如果 j 是直接和 i 毗邻的 4 个单元之一, w_{ij} 为 1, 如果是其他单元或单元为无数据, w_{ij} 为 0。一般地, 当 $I>0$ 或者 $0<C<1$ 时, 表示正空间自相关; 当 $I=1$ 或 $C=1$ 时, 表示随机独立, 数据集不存在空间自相关; 当 $I<0$ 或 $C>1$, 数据呈现负相关。地形呈现正相关状态, 一般地 $I>0.5$ 或者 $C<0.5$, 说明 DEM 数据集具有明显的正自相关特性。

地形结构特征具有全局性, 目前尚未有合适的量化指标进行表征, 本文拟采用等高线套合检查的方式进行定性描述, 也就是说, 通过转换前 DEM 提取的等高线和转换后提取的等高线进行叠合分析, 如果等高线基本一致, 则认为结构特征得以保留, 反之结构特征丢失, 导致转换后的 DEM 地形表达失真。

2 实验样区与流程

图 1 为本文的实验样区, 一为陕北韭园沟的部分地区, 是典型的黄土丘陵沟壑地貌类型, 地表形态复杂, 沟壑纵横, 以发育充分的脊梁地貌为主, 平均海拔高度为 1 018 m, 坡面起伏较大; 另一实验样区为山西省寿阳县宗艾镇, 位于晋中东部山地地区, 黄土高原东部边缘, 地质破碎但地形相对平缓, 北部较高, 向东南逐渐倾斜, 呈阶梯状分布, 平均海拔为 1 100 m。样区 DEM 数据均为 1:1 万 5 m 分辨率, 其中韭园沟样区面积为 16.2 km², 宗艾样区为 9 km²。

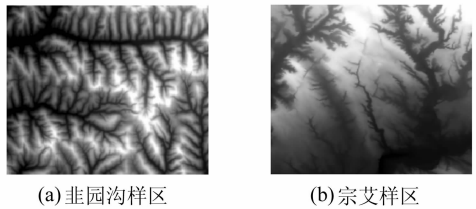


图 1 实验样区 DEM (颜色越深, 高程越低)

Fig. 1 Study Areas

利用 PSF 实现 DEM 尺度转换, 实际上是一个卷积的过程。首先需要构建不同尺度的 PSF 作为卷积模板, 本文采用的 PSF 为高斯函数, 分辨率分别设为 15 m×15 m、25 m×25 m、35 m×35 m、45 m×45 m、55 m×55 m、65 m×65 m、75 m×75 m 等。

利用已生成的高斯模板与 DEM 进行卷积以实现 DEM 的尺度上推。为分析对比起见, 本文还选择了常用的最邻近、双线性和立方卷积 3 种

重采样方法分别实现相应尺度的转换,最后利用高程特征统计、随机样点的中误差、莫兰指数及等高线套合等指标对不同转换结果进行评价。

3 结果分析与讨论

图 2 是两个样区利用 PSF、最邻近、双线性和立方卷积 4 种方法实现 DEM 尺度转换后的高程数据统计结果。从图中可以看出,当分辨率推至 15 m 时,每一种方法都能很好地保持原始数据的均值和方差。随着转换尺度的增大,最邻近、双线性和立方卷积转换结果的均值都不同程度地偏离原始 DEM 均值,而 PSF 的均值变化幅度较小;就标准差而言,两个样区的基于 PSF 的方差有随栅格分辨率的降低而逐步衰减的趋势,但幅度不大,而立方卷积在韭园沟样区虽然与 PSF 比较接近,但在宗艾样区却随着转换因子的增大而衰减,其

他两种方法在两个样区都有较大程度的衰减。这说明 PSF 方法的平滑效应使得原有的 DEM 数据结构信息有所衰减,但其标准差衰减幅度始终小于其他 3 种方法;PSF 方法不但在保持 DEM 结构信息方面优于其他方法,同时也对地形有较强的适应性。

为了进一步评价各种转换方法对高程数据的影响,在韭园沟样区随机抽取了 5 741 个采样点,宗艾样区抽取了 3 488 个采样点,并以原始采样点的高程为真值,对采样点高程值和不同尺度该点相应栅格高程进行交叉验证,计算随机散点不同尺度不同转换方法的 RMSE。参看图 2,随着 DEM 分辨率的降低,不论何种方法, RMSE 都在逐步增大,高程数据精度在损失,尽管在分辨率为 15 m 时 4 种方法的 RMSE 接近,但在较大分辨率情况下,基于 PSF 的尺度转换结果有最小的中误差,其变化幅度也比较小。

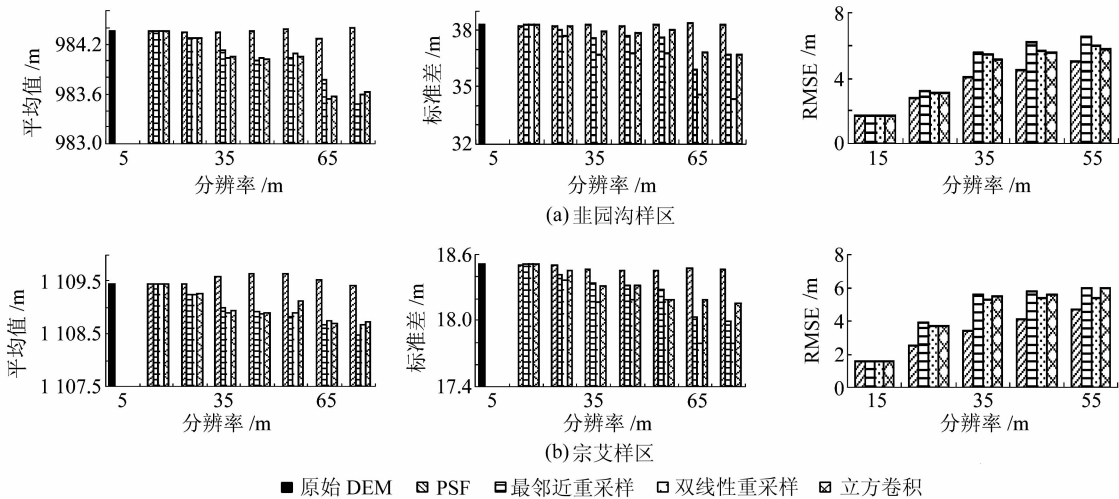


图 2 不同转换方法下的 DEM 高程统计结果
Fig. 2 Elevation Statistics Features of Different Methods for Various Scales

图 3 为两个样区不同算法空间自相关特性统计,从图中可看出,两个样区的 Moran'I 值随着 DEM 分辨率的降低而逐渐减小,不同地形递减速度不同。最邻近、双线性、立方卷积 3 种方法的递减速度小于 PSF 方法,但当尺度推绎到 75 m 时,各种方法的 Moran'I 值都能保持在 0.5 以上,这说明尽管 PSF 在空间自相关性保持方面略逊于其他 3 种方法,但也能保持较高的空间自相关特性。

图 4 为韭园沟样区在不同方法下的等高线套合结果。从实验结果直观地看,当转换因子比较小时,各种方法的等高线套合结果都比较好;随着分辨率的降低,各种方法呈现出不同地形失真。基于 PSF 的等高线在位置上仍与原等高线整体

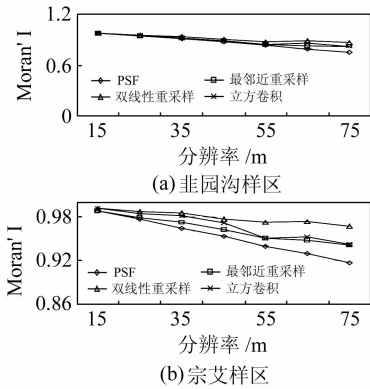


图 3 不同转换方法下的莫兰指数
Fig. 3 Moran'I Statistics of Different Methods for Various Scales

套合,只是形态上出现逐渐平滑,当分辨率大于 45 m 时丢失部分山顶信息;最邻近和双线性重采样的等高线也出现平滑,虽然能够保持原等高线的整体形态,但等高线的位置都发生了整体平移的现象,并且在 35 m 时就丢失了大部分的山顶信息,等高线结构开始出现混乱;立方卷积在位置和形态上与前两种方法类似,但保留的信息量比前两种较多。宗艾样区与韭园沟有类似的结果,转换尺度为 15 m 时各种方法的转换结果都比较好,尺度逐渐增大时,常用的 3 种重采样方法都出现等高线位置平移,只是由于地形相对平坦,转换后的等高线信息量损失较小。对比套合结果表明,PSF 的 DEM 尺度转换方法在等高线位置、形态和信息量上都较其他 3 种方法有效。

综上所述,PSF 尽管在保持空间自相关方面略逊于其他方法,但在统计特征和形态结构方面

却较其他方法为优,同时从图 2~4 也可看出,PSF 方法还具有两个特点:一是有着较大尺度域,就本文所选的 7 种分辨率看,从 15 m 到 75 m,PSF 方法的均值和标准差几乎没变,而其他方法随着分辨率的降低,均值和标准差变化较快;在地形特征方面看,从 15 m 到 75 m,PSF 方法恢复的地貌形态除小的细节丢失外,整体地形结构得以保留,而其他方法在 35 m 后就产生地形结构的失真现象。二是本文所选的两个样区地貌复杂程度不同,PSF 方法在两个不同地貌类型区变化规律基本相同,这说明 PSF 受地形复杂性影响较小。因此,总的来说,PSF 方法不仅能够保持原始 DEM 的统计特征,同时也能较好地保持原始 DEM 的结构特征,是一种受地形复杂度影响较小的 DEM 尺度转换方法。

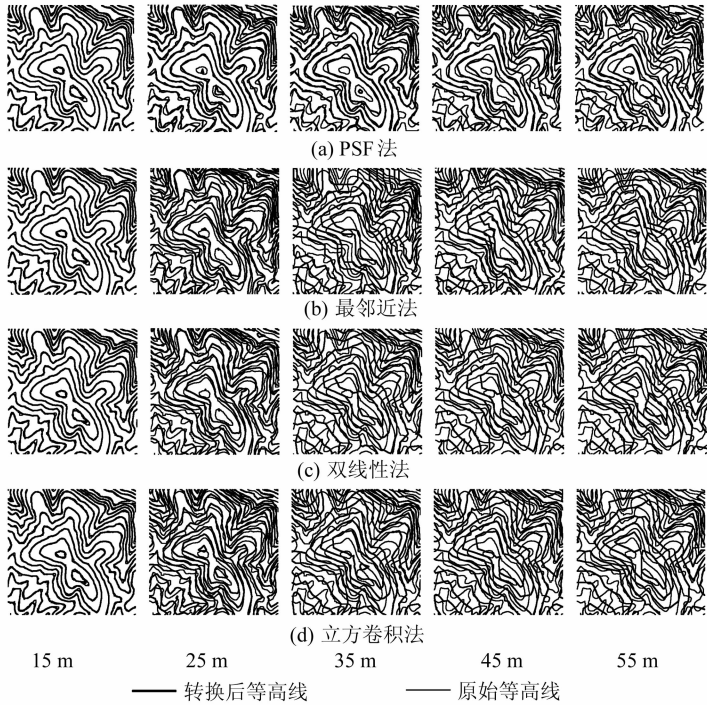


图 4 韭园沟样区不同转换方法的局部等高线套合
Fig. 4 Contour-Matching Based on Different Methods and Various Scales for Jiuyuangou

4 结 语

- 1) 基于 PSF 的 DEM 尺度转换具有较好的高程数据统计特征。
- 2) PSF 方法在保持原始 DEM 的自相关特征方面略差于其他方法,但仍能保持 Moran'I 值在 0.5 以上。
- 3) PSF 方法在地形失真程度上比最邻近、双线性和立方卷积要小。

此外,PSF 方法还具有较大尺度域和受地形影响小的特点。

虽然实验证明 PSF 用于 DEM 尺度转换是有效的,但仍有一些问题有待进一步研究,如不同 PSF 对转换后的 DEM 影响程度、转换后 DEM 在地形因子(如坡度、坡向)等方面的变化情况。

参 考 文 献

[1] 刘学军,卢华兴,仁政,等.论 DEM 地形分析中的尺度问题[J].地理研究,2007,26(3):433-442

[2] 吴勇,汤国安,杨昕. 小波派生多尺度 DEM 的精度分析[J]. 测绘通报,2007(4):38-41

[3] Mallat S. A Theory for Multiresolution Signal Decomposition: the Wavelet Representation [J]. Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence,1989,11(4):674-693

[4] 吴凡,祝国瑞. 基于小波分析的地貌多尺度表达与自动综合[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2001, 26(2): 170-176

[5] 刘春,王家林,刘大杰. 多尺度小波分析用于 DEM 网格数据综合[J]. 中国图像图形学报,2004,9(3): 340-344

[6] 于浩,杨勤科,张晓萍,等. 基于小波多尺度分析的 DEM 数据综合研究[J]. 测绘科学,2008,33(3):93-95

[7] 王建,杜道生. 规则格网 DEM 自动综合方法的评价[J]. 武汉大学学报·信息科学版,2007,32(12): 1 111-1 114

[8] 周启鸣,刘学军. 数字地形分析[M]. 北京:科学出版社,2006

[9] Du Hong, Voss K J. Effects of Point-Spread Function on Calibration and Radiometric Accuracy of CCD Camera[J]. Applied Optics, 2004,43(3):665-670

[10] 梅益君,王元庆. 基于点扩散函数的多聚焦图像融合方法[J]. 计算机工程,2007,33(19):193-195

[11] 柏延臣,王劲峰. 遥感信息的不确定性研究:分类与尺度效应模型[M]. 北京:地质出版社,2003

[12] 李双成,蔡运龙. 地理尺度转换若干问题的初步探讨[J]. 地理研究,2005,24(1):11-18

[13] 吕成淮,何小海,陶青川. 图像复原中高斯点扩展函数参数估计算法研究[J]. 计算机工程与应用, 2007, 43(10):31-34

[14] Peckham R J, Jordan G. Digital Terrain Modelling [M]. Heidelberg: Springer Berlin, 2007

第一作者简介:刘学军,博士,教授,博士生导师。主要研究方向为 DEM 及其地形分析、GIS 空间分析、空间数据不确定性等。
E-mail:liuxuejun@njnu.edu.cn

A Upscaling Method of Digital Elevation Model with Point Spread Function

LIU Xuejun¹ WANG Yanfang¹ JIN Bei¹

(1 Key Laboratory of Virtual Geographic Environment, Ministry of Education, Nanjing Normal University,
1 Wenyuan Road, Nanjing 210046, China)

Abstract: DEM(digital elevation model) and terrain analysis based on DEM are scale-dependant. DEM scale transition that deducting other more scales from a fixed resolution is always met in application such as hydrology, soil science, and geomorphology. We present a new DEM scale transition with point spread function which is of image blur. The presented method is carried out by the spatial convolution between DEM with fixed resolution and simulated point spread functions with different radiuses. Then elevation statistics, contour-matching, and autocorrelation are designed to evaluate the transformed DEM. Finally the results achived with the proposed method were compared with the results of nearest neighbor assignment, bilinear interpolation and cubic convolution in the two different study areas. The result shows that the proposed method is effective.

Key words: digital elevation model; point spread function; upscaling; resolution

About the first author: LIU Xuejun, Ph. D., professor, Ph. D supervisor, majors in DEM and terrain analysis, spatial analysis in GIS and uncertainty of spatial data etc.
E-mail: liuxuejun@njnu.edu.cn