

基于水系改进的数字高程模型内插研究

沈涛^{1),2)} 李成名²⁾ 苏山舞²⁾

¹⁾(武汉大学遥感信息工程学院,武汉 430079) ²⁾(中国测绘科学研究院地图学与地理信息系统研究所,北京 100039)

摘要 流域地形是决定水系生成的一个关键性因素,是数字流域和分布式水文模型研究的主要内容。针对现有应用数字高程模型进行水文分析时存在的若干问题,在对当前数字高程模型的生成算法进行讨论的基础上,提出在利用现有方法进行内插的过程中加入河流数据进行方向判断和高程修正的算法。通过试验与分析,得出应用本方法生成的数字高程模型在保留精度的基础上,较好地反映了地表水文特征和河流结构,利用它不仅可以进行一般的地质分析,还能够作为水文模拟与研究的数据源。

关键词 数字高程模型 水文 内插 精度

中图分类号: P28 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2006)04-0535-05

An Interpolation Method of DEM Based on Hydrological Improved Algorithm

SHEN Tao^{1),2)}, LI Cheng-ming²⁾, SU Shan-wu²⁾

¹⁾(School of Remote Sensing and Information Engineering, Wuhan University, Wuhan 430079)

²⁾(Cartology & GIS Institute, Chinese Academy of Surveying & Mapping, Beijing 100039)

Abstract The watershed topography is a key factor for extraction of the drainage, and it is also a very important topic in the study of digital watershed and the distributed hydrological models. The paper firstly discusses some problems in hydrological analysis by applying the DEM, and describes three kinds of interpolation models to produce the DEM. Then the author introduces an interpolation method which could improve the accuracy of the DEM by judging the stream's flow direction. Finally the interpolation algorithm is applied to generate the DEM by using the elevation and stream data in the area of southwest China. We analyze the results of the experiment, and find that the DEM created by this method not only keeps its precision but also presents a fine surface runoff character and stream pattern. Moreover, by comparing with the stream lines that extracted from different DEMs, the paper concludes that the DEM created by the hydrological improved algorithm is more useful in dealing with the hydrological analysis.

Keywords digital elevation models, hydrology, interpolation, precision

1 引言

数字高程模型(DEM)是描述地面高程值空间分布的一组有序数组,是一定分辨率的局部地面高程的映射,通常有网格(GRID)、不规则三角网(TIN)和矢量(等高线和高程点)(DLG)3种形式。

DEM中蕴涵着丰富的地形、地貌信息,能有效地反映区域的基本地形空间分布规律与地貌特征。目前已普遍应用于测绘和地学分析的各个领域。由于一个良好反映地表水文形态的数字高程模型能够根据地形的局部特征,借助一定的算法,通过对流域水文特征、地貌特征及其相互作用机理的分析,进行一定地理空间范围内的水文模拟与研究,因此它也是用

基金项目:科技部科技基础性工作专项资金项目(2002DEA30026)

收稿日期:2005-03-09;改回日期:2005-06-20

第一作者简介:沈涛(1976~),男,助理研究员。现为武汉大学摄影测量与遥感专业博士研究生。主要研究方向为城市GIS。E-mail:shentao@casm.ac.cn

于流域地形分析的主要数据。

针对于此,许多学者研究了在 DEM 的基础上进行提取流域水文要素信息的方法,所提取流域的数字特征包括确定单元格网的流向、汇流路径、河网间的拓扑结构等。此外,还有基于格网的地形分析技术在流域水文建模中的应用,一般采用了坡面径流模拟方法^[1,2]。通过对现有的 DEM 进行预处理后进行流域河网和分水线这两大地貌特征的提取,即通过填充 DEM 内的洼地,以及进行集水面积和水流方向的计算,最终达到自动提取水系及相关要素的目的^[3,4]。

但是由于受到 DEM 本身精度、数据结构、内插算法以及相关误差处理方法等因素的影响,生成的水系在空间位置的精确性和合理性方面并不是总能够满足流域地形分析的需要。对于高程落差变化较大的地区,主要问题是生成的水系破碎和不连续,而对于平坦地区,则存在生成的水系比较平直不自然,与自然水系的偏差较大等问题。

针对以上问题,研究在数字高程模型的内插算法中,加入已知的水系数据进行方向判断,通过设置水系强制条件,使生成的 DEM 在不损失其精度的基础上,保留了河流结构的连续性,较好地反映了地表的水文特征,从而可以更好地进行后期的流域水文分析。

2 基于水系的 DEM 内插算法

2.1 DEM 内插算法

内插是数字高程模型的核心问题,按内插点的分布范围,可以分为整体内插、分块内插和逐点内插 3 类^[5]。

整体内插的模型是由研究区域内所有采样点的观测值建立的,这类内插模型可以模拟大范围的宏观变化,但是不能提供内插区域的局部特征,因此实际工作中很少用于直接内插。逐点内插法是以待插点为中心,定义一个局部函数去拟合周围的数据点,数据点的范围随待插点位置的变化而变化,因此又称为移动曲面法。逐点内插应用简便,但计算量大,如何确定内插窗口域,是内插精度与速度的关键所在。

分块内插则是把需要建立数字高程模型的地区,切割成有一定尺寸的规则分块,形状一般是矩形,其尺寸根据地区地貌的复杂程度和数据比例而定。这样在每一块上就可展铺开一张数学曲面,应用这张数

学曲面进行分块范围内的高程插值。相对于整体内插,分块内插能够较好地保留地物细节,并通过块间重叠保持内插曲面的连续性,是较常采用的方法。

各种 DEM 内插方法在不同的地貌特征和不同采点方式下有不同的误差,在应用中只有根据各方法的特点,结合不同应用重点,从内插精度、速度等方面选取适宜的最优方法。

选用离散高程点作为内插数据源,将水系数据加入 DEM 的内插运算,应用分块内插方法建立数字高程模型,并对分块单元用双三次曲面方程求解,曲面方程为

$$z = f(x, y) = a_1x^3y^3 + a_2x^2y^3 + a_3xy^3 + a_4y^3 + a_5x^3y^2 + a_6x^2y^2 + a_7xy^2 + a_8y^2 + a_9x^3y + a_{10}x^2y + a_{11}xy + a_{12}y + a_{13}x^3 + a_{14}x^2 + a_{15}x + a_{16} \quad (1)$$

一般可以根据已知的点位坐标和相关力学条件,进行方程组系数求解。即通过三次曲面,满足保持相邻面片拼接处扭矩和在 x, y 方向的斜率分别连续的条件,根据 4 个角点的斜率和扭矩建立方程组求解系数 $a_1, a_2, a_3, \dots, a_{16}$, 然后代入式(1),从而解算某点的高程。

$$\begin{cases} f_x = \partial z / \partial x \\ f_y = \partial z / \partial y \\ f_{xx} = \partial^2 z / \partial x^2 \\ f_{yy} = \partial^2 z / \partial y^2 \\ f_{xy} = \partial^2 z / \partial x \partial y \end{cases} \quad (2)$$

上式中 f_x, f_y 和 f_{xy} 分别表示三次曲面的一阶导数和二阶混合导数,以之进行斜率和扭矩的计算, f_{xx} 和 f_{yy} 为曲面的二阶导数。

以上对于多项式方程组系数的求解,采用了弹性力学条件,但是地表分块不是狭义的弹性壳体,因此采用扭矩连续作为插值条件并不是良好的数学模型。为了保证数字高程模型能够良好地反映地表起伏形态,针对二元样条函数可以采用以下条件进行限制:

$$\begin{cases} F_1 = \iint (f_x^2 + f_y^2) dx dy \\ F_2 = \iint (f_{xx}^2 + 2f_{xy}^2 + f_{yy}^2) dx dy \end{cases} \quad (3)$$

其中, F_1 与内插结果的离散度相关,而 F_2 与内插后曲面曲率相关,减小 F_2 可以使内插结果细节突出^[6]。考虑到自然界地形的统计特征,可以采用以下经验公式,以之取代扭矩连续作为内插条件求解系数。

$$F = 0.5F_1/d^2 + F_2 \quad (4)$$

式中, d 是栅格的间距, 即当前的栅格分辨率。这样最终的双三次曲面方程系数求解满足条件为

$$\begin{cases} f_x = \partial z / \partial x \\ f_y = \partial z / \partial y \\ F = 0.5 F_1 / d^2 + F_2 \end{cases} \quad (5)$$

二元样条函数不仅保证了分块间连接处的平滑连续, 而且保留了地貌起伏特征。同时在加入水系数据修改曲面的某一分块时, 可以不重新计算整个曲面。

2.2 基于水系的 DEM 内插

基于水系的 DEM 内插算法的本质就是在内插过程中在指定容限值内搜寻并去除存在的低洼点, 同时在内插曲面上, 沿着河流生成线性沉降的栅格值。即将河流数据作为有向链线段, 在内插时通过将流向高程相矛盾的高程数据点进行剔除或修改, 从而保证在该线段上的高程数据的线性下降。

河流数据参与运算的主要原理如下: 首先对矢量河流数据进行预处理, 保证河流流向的正确性; 然后将河流进行直线化处理, 如图 1 所示, 虚线表示一条从左下流向右上的河流, 将其进行分段直线化, 成为重实线, 其中每段线段与垂直方向的夹角只能是 0° 或 45° , 因此, 对于应分别表示为线段 CX 和 XY 的河流数据, 直接表示成 CY ; 同时为了避免生成的 DEM 在河流方向产生尖锐变化, 加入了边界条件, 如图中细实线所示, XY 与 EF 都为河流的边界条件。

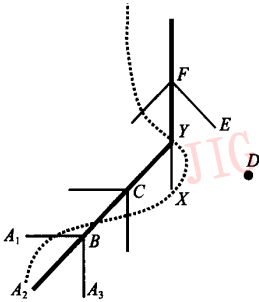


图 1 高程沿河流线性下降示意图

Fig. 1 Linear descendant elevation following the river direction

在应用 2.1 节中的 DEM 内插算法进行计算时, 将经过上述方法生成的河流数据加入进来, 参与高程判断与修正, 即任意的河流所在栅格点的高程值应满足以下条件。

$$\begin{cases} h_{to} \leq h \leq h_{flow} \\ h_c \leq h_B \leq \text{Min}(h_{A_1}, h_{A_2}, h_{A_3}) \\ h_f \leq h_E \leq h_D (d_{DE} \leq \kappa, \kappa = 2\sqrt{2}d) \end{cases} \quad (6)$$

其中, h 为河流所在的栅格点高程, $h_{no.w}$ 和 h_{to} 分别为该河流的起始点和终点; 对于任意的河流线, 可以有若干个上游线段, 但只能有一个相邻的下游线段, 如对于点 B , 有 3 条上游线段和一条下游线段, 则 B 点的高程值 h_B 应该小于等于 A_1, A_2 和 A_3 点中的最小值, 而大于 C 点的高程值 h_C ; 对于点 E , 只有一条下游线段而无上游线段, 则它的高程值 h_E 应位于 FE 延长线所在方向的高程点 D 的高程 h_D 和点 F 的高程 h_F 之间, 而 d_{DE} 表示两点之间的距离应在给定的容限 κ 内, 在此取容限为栅格的间距 d 的 $2\sqrt{2}$ 倍。由此, 通过在内插过程中加入河流数据, 可以得到沿河流线性下降的 DEM。

3 试验与结果分析

选取位于东经 $104^\circ 00' \sim 105^\circ 30'$, 北纬 $32^\circ 30' \sim 34^\circ 00'$ 之间地区作为试验区域, 位于川北陕南, 试验数据采用全国 1:100 万等高线、高程点、水系和数字高程模型数据。

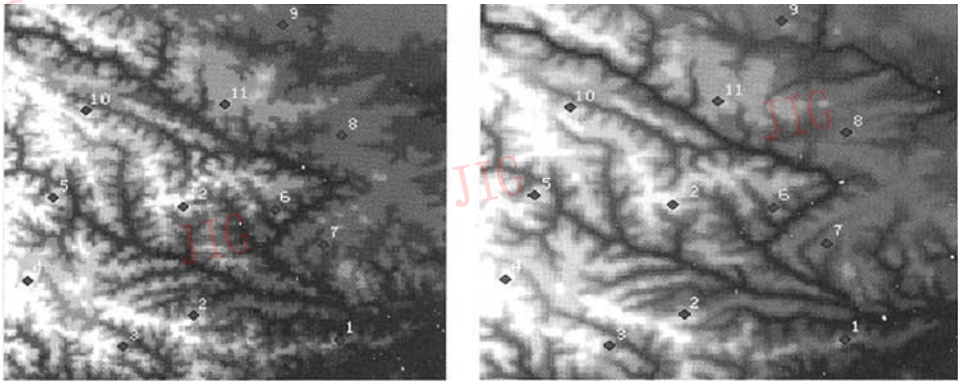
利用等高线、高程点及水系数据应用本文算法内插生成 DEM, 作为比较, 试验还利用相同数据源应用一般内插方法生成 DEM, 其格网间距都为 100m。试验采用部分未参与内插的高程点数据和全国百万 DEM 数据作为依据进行精度评定。

DEM 的精度主要由两个部分组成: 原始数据精度和高程内插精度。精度评定的主要思想是通过随机采样的方法比较内插高程与实际高程间的误差, 并由统计的方法计算出中误差进行精度检测, 为使问题简化, 假定原始数据都为真值, 用 12 个高程点数据进行检测, 生成的 DEM、采用的检测点及检测结果如图 2、表 1 所示。

假设检查点的高程为 $Z_k (k = 1, 2, \dots, n)$, 建立 DEM 后, 由 DEM 内插出的高程值为 R_k , 则 DEM 的精度为

$$\sigma_{DEM}^2 = \frac{1}{n} \sum_k (R_k - Z_k)^2 \quad (7)$$

计算得到三者的中误差分别为 264、144 和 136, 可以看出, 基于水系的内插方法在精度上是满足要求的; 百万 DEM 的中误差比较大的原因是因为采用的数据源不同, 全国百万数字高程模型是在全国 1:5 万地形图上采点生成的, 而后两者是在现有百万矢量数据上内插生成的, 检测高程点采用的是百万高程点数据, 因此结果是合理的。



(a) 直接内插生成 DEM

(b) 加入河流内插生成 DEM

图 2 结果与检测点示意图

Fig.2 Results and test points

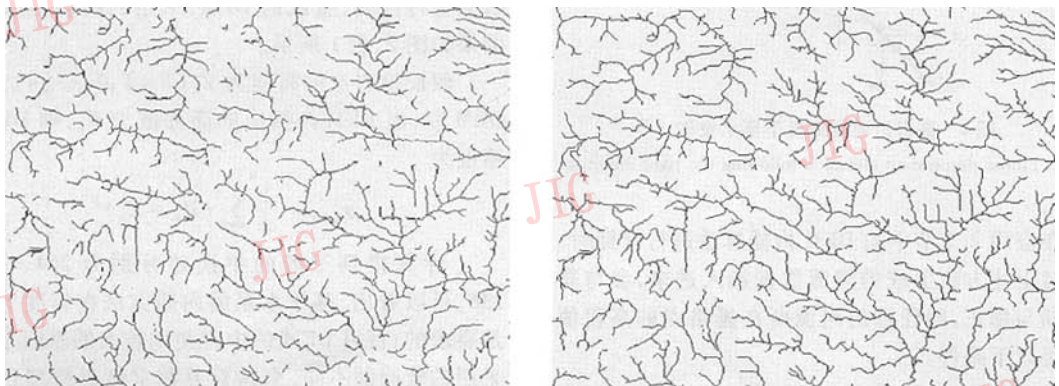
表 1 高程值检测比较表

Tab.1 Comparisons of the test points' elevation using different DEMs

	点												σ
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
高程点	2 546	3 382	3 002	4 256	3 812	2 551	2 256	2 225	2 419	3 979	2 993	4 181	0
百万 DEM	1 955	3 165	2 745	4 000	3 570	2 240	2 160	2 041	2 280	3 860	2 980	3 900	264
水系 DEM	2 407	3 311	2 980	4 251	3 624	2 528	2 124	2 201	2 352	3 682	2 934	3 958	144
一般 DEM	2 452	3 210	2 985	4 056	3 760	2 521	2 168	2 140	2 373	3 677	2 967	4 069	136

利用生成的两种 DEM 进行水文分析,并进行集水面积计算及水系生成,结果如图 3 所示。可以看出用一般方法内插生成的 DEM 计算出的河流线中间出现断续和不连贯,形成这种现象的主要原因是

由于内插 DEM 时未考虑水系因素;而基于水系方法生成的 DEM 计算出的河流线不仅连续,而且在空间位置上也与现有矢量河流数据密切套合,可以此作为水文分析的可靠基础。



(a) 直接内插的 DEM 生成的河流线

(b) 水系改进内插的 DEM 生成的河流线

图 3 水系生成比较示意图

Fig.3 Comparisons of the stream line extracted by two different DEMs

4 结 论

通过加入河流数据进行数字高程模型的计算,其结果不仅保持了数字高程模型的精度,而且能更好地反映河流结构和地表的水文特征。应用该方法生成的数字高程模型,不仅可以进行一般的地学分析,还能够作为水文模拟与研究的数据源,进行河流水系地形分析。该试验同时表明,算法在地形起伏比较大的地区效果比较理想,而对于东部平原河流与地形关系不大的地区,尚需要进一步地研究。

参考文献 (References)

- 1 Band L E. Topographic partition of watersheds with digital elevation models[J]. *Water Resources Research*, 1986, **22**(1):15 ~24.
- 2 O'Callaghan J F, Mark D M. The extraction of drainage networks from digital elevation data[J]. *Computer Vision, Graphics and Image Processing*, 1984, **28**(3): 323 ~ 344.
- 3 Zhou Gui-yun, Liu Yu, Wu Lun. Algorithms for extracting drainage network based on digital elevation model [J]. *Geography and Territorial Research*, 2000, **16**(4): 77 ~ 81. [周贵云,刘瑜,邬伦. 基于数字高程模型的水系提取算法[J]. *地理学与国土研究*, 2000, **16**(4):77 ~ 81.]
- 4 Li Chang-feng, Feng Xue-zhi, Zhao Rui. The methods and application of automatically extracting stream network of waters[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2003, **15**(3):205 ~ 212. [李昌峰,冯学智,赵锐. 流域水系自动提取的方法和应用[J]. *湖泊科学*, 2003, **15**(3):205 ~ 212.]
- 5 Li Zhi-lin, Zhu Qing. Digital elevation model(Second Edition)[M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2003. [李志林,朱庆著. 数字高程模型(第2版)[M]. 武汉:武汉大学出版社,2003.]
- 6 Hutchinson M F. A new procedure for gridding elevation and stream line data with automatic removal of spurious pits[J]. *Journal of Hydrology*, 1989, **106**(3): 211 ~ 232.