

一种由等高线构建 DEM 的新方法

宋敦江¹ 岳天祥² 杜正平²

(1 中国科学院科技政策与管理研究所,北京市海淀区中关村北一条 15 号,100190)

(2 中国科学院地理科学与资源研究所,北京市朝阳区大屯路甲 11 号,100101)

摘要:基于 HASM,提出了一种由等高线建立 DEM 的新方法 HASM-OC。HASM-OC 方法保证地形曲面的整体光滑性,保证 DEM 最大程度上忠实于原始等高线数据。实际等高线案例结果表明,HASM-OC 方法与基于薄板样条原理的 Hutchinson 方法的 DEM 模拟结果及其回放的等高线差相比,前者比后者保留更多的地形特征信息,前者的回放等高线比后者回放等高线更忠实于原始数据。

关键词:等高线树; HASM 优化控制; 薄板样条; Hutchinson 方法; 等高线回放

中图法分类号:P208

尽管新一代地球空间信息技术(如 InSAR、LiDAR 和数字摄影测量等技术)可快速获取 DEM 数据,但是传统的由人工解译地形得到的等高线仍然是一种十分重要的用于建立 DEM 的数据源^[1]。广泛应用于科研与日常生活中的国家测绘局 1:25 万、1:5 万及 1:1 万 DEM 数据,就是基于等高线和离散点通过建立 TIN (triangulated irregular networks) 后线性插值得到的^[2]。等高线数据是通过对地形(landforms)的抽象理解和概括而获得的一种数据,是从摄影测量立体像对模型中自动生成的,蕴涵着大量地形特征信息^[1],包括河流线和山脊线等。等高线蕴涵着大量地形信息,所以在基于等高线建立 DEM 时应选择具有针对性的方法,而不是选择通用的空间插值方法,如反距离权重(IDW)法、样条(spline)法和克里金(Kriging)法等^[3]。近 20 多年来,国外对由等高线构建 DEM 的方法进行了诸多研究^[3-4]。

HASM(high accuracy surface modeling)是我国学者 21 世纪初提出的基于微分几何曲面论的曲面建模新方法^[5-7]。HASM 需要对研究区域内每个待模拟网格点建立两个方程,故 HASM 最后需要求解一个巨大(百万阶以上)的线性方程组。目前,HASM 主要用于由离散点模拟曲面,

已有的数值模拟结果表明,HASM 用于由离散点建立 DEM 得到的结果比地理信息系统中传统方法的精度高许多倍^[5-6],但是对除离散点外的其他类型数据的 HASM 方法应用研究却很少^[3]。为了提高 HASM 在模拟离散点外的其他类型数据时的精度,更多的蕴含在原始数据中的地形信息需要被利用,需要建立更多的约束方程,于是,提出了优化控制(optimal control)HASM-OC 方法。等高线树是用于表示等高线空间拓扑关系的一种数据结构^[8],等高线拓扑关系主要包括父子的隶属层次关系或包含关系,以及邻接或兄弟并列关系,闭合等高线树的构建方法有很多。通过对等高线树数据结构的遍历,可以获得区域内任意一个网格点高程的上下界(为包围该网格点的所有等高线高程的最小值与最大值,开区间)。文献^[3]直接将等高线上的点按照一定的规则进行离散化,结果有不少不理想的地方,这是因为等高线的很多有用信息未被利用。优化控制方法应用广泛,但是运用优化控制方法进行 DEM 构建的研究几乎没有,本文利用等高线树来计算任意点的高程上下界,运用优化控制理论,提出了构建 DEM 的 HASM-OC 方法。

ANUDEM 是专业建立高精度 DEM 的软件包,其功能已经集成到 ArcGIS 系统中,执行命令

收稿日期:2012-01-25。

项目来源:国家自然科学基金青年基金资助项目(40801187);国家杰出青年科学基金资助项目(40825003);中国科学院资源与环境信息系统国家重点实验室开放研究基金资助项目(A0704)。

为 TopoToRaster_sa。ANUDEM 的基本算法由插值、数据平滑、地形强化等组成,其基本原理是薄板样条(thin plate spline, TPS),由于 ANUDEM 的核心算法是由 Hutchinson 首先提出^[9-10],故称为 Hutchinson 方法。由于在处理等高线时 TIN 方法产生“平三角”等不合理的现象,故 TIN 方法不适合用于由等高线数据构建 DEM, Hutchinson 方法是目前很多文献推荐使用的处理等高线数据的方法^[11], Hutchinson 方法采用 ArcGIS9.2 中的默认参数。

1 HASM 优化控制方法 (HASM-OC)

1.1 HASM-OC 的基本原理

设

$$\begin{aligned} \mathbf{F}^{n+1} = & (f_{1,1}^{n+1}, f_{1,2}^{n+1}, \dots, f_{1,J-1}^{n+1}, f_{1,J}^{n+1}, f_{2,1}^{n+1}, f_{2,2}^{n+1}, \dots, \\ & f_{2,J-1}^{n+1}, f_{2,J}^{n+1}, \dots, f_{I-1,1}^{n+1}, f_{I-1,2}^{n+1}, \dots, f_{I-1,J-1}^{n+1}, f_{I-1,J}^{n+1}, \\ & f_{I,1}^{n+1}, f_{I,2}^{n+1}, \dots, f_{I,J-1}^{n+1}, f_{I,J}^{n+1})^T \\ & n \geq 0 \end{aligned}$$

则 HASM 主方程 Dirichlet 边界问题的有限差分迭代形式可用矩阵形式表达为:

$$\begin{cases} \mathbf{A}\mathbf{F}^{n+1} = \mathbf{b}^n \\ \mathbf{B}\mathbf{F}^{n+1} = \mathbf{c}^n \end{cases} \quad (1)$$

式中, \mathbf{A} 和 \mathbf{b}^n 、 \mathbf{B} 和 \mathbf{c}^n 的详细结构信息可参见文献^[5-6]。假设:

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} \mathbf{A} \\ \mathbf{B} \end{bmatrix}, \mathbf{d}^n = \begin{bmatrix} \mathbf{b}^n \\ \mathbf{c}^n \end{bmatrix} \quad (2)$$

则 HASM-OC 方法可表达为:

$$\begin{cases} \min \|\mathbf{C}\mathbf{F}^{n+1} - \mathbf{d}^n\|_2 \\ \text{s. t. } \begin{cases} \mathbf{S} \times \mathbf{F}^{n+1} = \mathbf{t} \\ l < \mathbf{F}^{n+1} < u \end{cases} \end{cases} \quad (3)$$

式中,等式约束来源于等高线离散化后的采样数据;上下界约束来源于等高线间的区域。

等高线(结合图廓边界)将研究区域分成各子区域。对于每个子区域内的网格点,根据包围的等高线,可以确定网格点高程值的范围。如图 1 所示,等高线的间距为 2.5 m,等高线高程范围为 117.5~132.5 m,等高线的高程值用数字标注,方格代表一个栅格单元,带编号(31~66)的点表示该栅格的中心点除了等高线数据外,还有 1 个采样点 A(三角点)位于网格点 46 上,高程为 134 m。

由于网格点 51 处于等高值为 117.5 和 120 之间,所以对网格点 51 的高程,应该满足不等式 $l(51) < f(51) < u(51)$, 其中 $l(51) = 117.5$ 和

$u(51) = 120$ 。网格点 46 所在的子区域为山峰,其中有一个离散采样点 A,高程为 134,一般可以近似地认为是该山峰的高程最大值点。对网格点 46,其高程应该满足不等式 $l(46) < f(46) < u(46)$, 其中 $l(46) = 132.5$, $u(46) = 134$ 。若网格点 46 所在山峰没有采样点,则其高程所满足的不等式中,上界值 $u(46)$ 可以取为 135,即为围成这片区域等高线的等高值加上 1 倍的等高距。对于洼地区域,也作类似处理。

对于每个网格点,可以根据其所在的子区域获得其高程范围,其高程都可以建立不等式,从而得到不等式组,而且在 HASM-OC 迭代过程中,曲面应该一直满足这一不等式组,即

$$l < \mathbf{F}^{n+1} < u \quad (4)$$

$$\begin{aligned} l = & (l_{1,1}, l_{1,2}, \dots, l_{1,J-1}, l_{1,J}, l_{2,1}, l_{2,2}, \dots, l_{2,J-1}, \\ & l_{2,J}, \dots, l_{I-1,1}, l_{I-1,2}, \dots, l_{I-1,J-1}, l_{I-1,J}, l_{I,1}, l_{I,2}, \\ & \dots, l_{I,J-1}, l_{I,J})^T \\ u = & (u_{1,1}, u_{1,2}, \dots, u_{1,J-1}, u_{1,J}, u_{2,1}, u_{2,2}, \dots, \\ & u_{2,J-1}, u_{2,J}, \dots, u_{I-1,1}, u_{I-1,2}, \dots, u_{I-1,J-1}, \\ & u_{I-1,J}, u_{I,1}, u_{I,2}, \dots, u_{I,J-1}, u_{I,J})^T \end{aligned}$$

式中, $l_{i,j}$ 、 $u_{i,j}$ 分别表示网格点 (x_i, y_j) ($0 < i < I+1, 0 < j < J+1$) 高程的两个控制值。值得注意的是,当等高线正好穿过或者非常接近网格点时,可以把这个网格点当成采样点。设定一个参数 ε , 对某个网格点 (x_i, y_j) , 当最近的等高线与其距离小于 ε 时,则将这个网格点定义为采样点,如图 1 中网格点编号为 43、56、57 和 62 等等网格点,高程值为对应的等高线高程值。

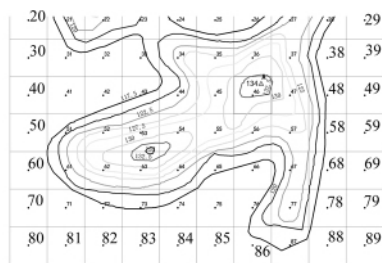


图 1 根据等高线确定离散网格点
上下界约束示意图

Fig. 1 Determine Upper and Lower Bound of Grid Point from Contours

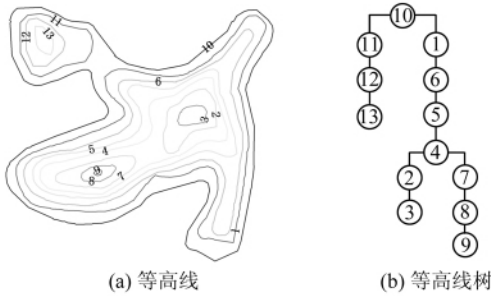
1.2 任意点的值范围的确定方法

图 2(a)是等高线,共有 13 条等高线,形成 3 个山峰,在图 2(b)对应的等高线树中则形成 3 个叶子结点。由等高线树确定格网点的过程如下。

- 1) 两条父子关系的等高线之间的网格点高程上下界为包围该点的两条等高线的高程值;
- 2) 马鞍处的网格点高程值上下界为包围该

点的所有等高线高程值的极大值和极小值；

3) 山峰点的高程值上下界为包围该点的等高线(只有 1 条)加上 1 倍的等高距,类似地,还可以获得山谷点的高程值上下界。



由于数据的有效范围为等高线的凸包,故只显示了与 Hutchinson 和 HASM-OC 方法凸包范围内的 DEM。从图 5 可看出, Hutchinson 保证了山顶的峰值,但是将山峰周围的区域压低,形成多个孤岛,遗弃了很多地形细节;而 HASM-OC 方法则保留了地形细节,地形细节丰富,地形曲面连续光滑、自然。特别在多处“弯月”型山谷中, Hutchinson 方法将多个弯月型的山谷连接了起来,得到变形了的地形曲面。在马鞍处也出现很大变形,而这些地形信息在 HASM-OC 方法构建的 DEM 都得到了较好的保留。

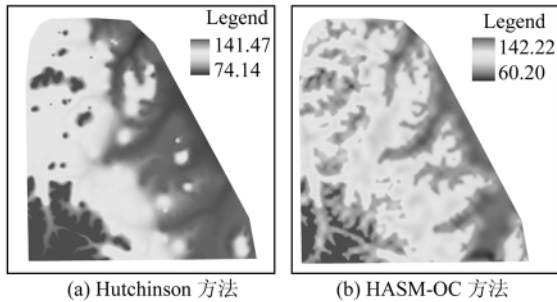


图 5 DEM 结果比较图

Fig. 5 DEM from Method

通过回放等高线、可视化叠加分析可以发现(图 6), Hutchinson 方法出现许多等高线缠结在一起的现象,许多分离的等高线被 Hutchinson 方法连接在一起,在马鞍处出现等高线振荡现象(图 6(a))。HASM-OC 回放的等高线与原始等高线吻合得十分好(图 6(b)), HASM-OC 方法回放的等高线与原始等高线条数相同(76 条)没有出现振荡,而 Hutchinson 方法回放的等高线(109 条)与原始等高线(76 条)相差非常大。类似地,从 2.5 m 等高距的等高线中抽取了 10 m 等高距的等高线进行模拟试验,得到类似的结果, Hutchinson 方法回放的等高线(143 条)与原始等高线(152 条)相差非常大,而 HASM-OC 方法回放的等高线条数则仍与原始等高线条数相等。

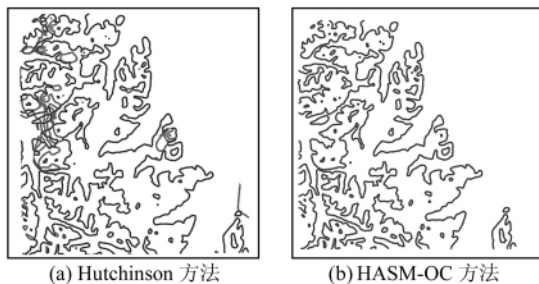


图 6 回放等高线与原始等高叠加图

Fig. 6 Original Contours and Derived Contours from Method

3 结 语

HASM-OC 方法模拟得到的 DEM 能保留更多的地形信息,回放等高线与原始等高线十分吻合;相对来说, Hutchinson 方法的回放等高线与原始等高线差别较大。从模拟的 DEM 来看, HASM-OC 保留了大量的地形细节, Hutchinson 方法遗失很多地形细节,这可能是由于 Hutchinson 方法中的“地形强化”这个步骤出现了问题,特别是在“马鞍”处和“弯月”处,地形特征一般很难提取。另外 Hutchinson 方法基于薄板样条,不可避免地会产生振荡,如文中出现“孤岛”现象。

下一步的研究方向包括从等高线中提取地形特征点与特征线,并将地形特征点与特征线作为 HASM-OC 方法新的(等式或不等式)约束条件,构建更高精度 DEM。

参 考 文 献

- [1] Hutchinson M F, Gallant J C. Digital Elevation Models and Representation of Terrain Shape[C]. Terrain Analysis: Principles and Applications, USA, 2000
- [2] Li Zhilin, Zhu Q. Christopher Gold. Digital Terrain Modeling: Principles and Methodology[M]. N Y: Taylor & Francis, 2005
- [3] 宋敦江,岳天祥,杜正平. 由等高线建立 DEM 的 YUE-HASM 方法研究[J]. 地球信息科学, 2009, 11(3): 325-332
- [4] 黄培之. 基于等高线特性的三维表面重建方法的研究[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2005, 30(8): 668-672
- [5] 岳天祥,杜正平,刘纪远. 高精度曲面建模与误差分析[J]. 自然科学进展, 2004, 14(2): 83-89
- [6] Yue Tianxiang, Song Dunjiang, Du Zhengping, et al. High Accuracy Surface Modeling and Its Application to DEM Generation[J]. International Journal of Remote Sensing, 2010, 31(8): 2 205-2 226
- [7] 宋印军,岳天祥. 基于多重网格法求解的高精度曲面建模模型[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2009, 34(6): 711-714
- [8] Chen Jun, Qiao C F, Zhao Renliang. A Voronoi Interior Adjacency-based Approach for Generating a Contour Tree[J]. Computers & Geosciences, 2004 (30): 355-367
- [9] Hutchinson M F. Calculation of Hydrologically Sound Digital Elevation Models[C]. The Third International Symposium on Spatial Data Handling, International Geographical Union, Columbus,

- Ohio, 1988
- [10] Hutchinson M F. A New Procedure for Gridding Elevation and Stream Line Data with Automatic Removal of Spurious Pits[J]. Journal of Hydrology, 1989(3/4): 211-232
- [11] 杨勤科, Mcvcar T R, 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

第一作者简介: 宋敦江, 助理研究员, 博士, 主要从事融合特征的曲面建模与球面空间统计研究。
E-mail: songdj@casipm. ac. cn

A New Method of DEM Generation from Contour Line

SONG Dunjiang¹ YUE Tianxiang² DU Zhengping²

(1 Institute of Policy and Management, Chinese Academy of Sciences, 15 Beiyitiao, Zhongguancun, Haidian District, Beijing 100190, China)

(2 Institute of Geographical Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, A11 Datun Road, Chaoyang District, Beijing 100101, China)

Abstract: This paper proposed a new method (HASM-OC) to construct DEM from contour lines based on the optimal control. Presently, HASM (high accuracy surface modeling) which is used to handle discrete points only. Firstly a regular grid points' are set up, on which each elevation will be predicted using the new method, each grid point represents the square grid area surrounding itself. Secondly, contour lines are used to construct contour trees, which are then used to get the bound constraints for each grid points. Finally, integrating the HASM equations, a numerical optimization problem is formed. By solving the optimization problem DEM can be secured, which is continuous and of high fidelity to original contours. A real contour lines example is given, and results from HASM-OC is compared with that from Hutchinson method based on TPS (thin plate spline), the former is superior to the latter in DEM construction from real contour lines.

Key words: contour trees; HASM-OC(optimal control); TPS(thin plate spline); Hutchinson method; derived contours

About the first author: SONG Dunjiang, assistant researcher, Ph. D, majors in digital terrain modeling incorporating terrain features and spherical spatial statistics.

E-mail: songdj@casipm. ac. cn

武汉大学 6 项成果获 2011 年度国家科技奖励

日前, 武汉大学有 6 项成果获 2011 年度国家科学技术奖, 其中主持完成 4 项。据教育部科技发展中心统计, 此次该校获国家三大科技奖励通用项目数位列全国高校第七, 以第一完成单位获国家三大科技奖励通用项目数位列全国高校第五。其中, 我刊编委、国家卫星定位系统工程技术研究中心施闯教授主持完成的“全球卫星导航系统精密定轨定位数据处理理论、方法和软件系统”、测绘学院李建成院士主持完成的“基准和空间信息快速获取关键技术及其在灾害应急测绘中的应用”两项成果获国家科技进步二等奖。