

文章编号:1673-6338(2007)01-0057-04

DEM 建模方法的研究与实践

潘攀, 王光霞, 张华

(信息工程大学 测绘学院, 河南 郑州 450052)

摘要:在分析移动曲面拟合与加权平均算法特点的基础上,提出以移动曲面拟合法为主、加权平均法为辅两者相结合的方法,使它们能够相互取长补短,从而解决大区域 DEM 建模中存在的问题。对接边处的误差可以进行误差改正并用样条函数对其重建使其光滑。结合 5 种地貌类型的 1:5 万地形图数据进行试验,用中误差对试验结果进行评估和分析,得出该方法在丘陵地区的建模误差最小、效果较好,为今后大区域 3 维建模提供一种更为精确和合理的方法。

关键词:数字高程模型;移动曲面拟合;加权平均;DEM 内插

中图分类号:P208

文献标识码:A

Study and Practice of DEM Generation

PAN Pan, WANG Guang-xia, ZHANG Hua

(Institute of Surveying and Mapping, Information Engineering University, Zhengzhou 450052, China)

Abstract:In this paper, constructing DEM was discussed based on rectangular grid. A method was provided which combined moving surface fitting with distance-weighted to build large area DEM based on analyzing their characteristic. It could learn from other's strong points to offset one's weakness. So some difficulties of building large area DEM was solved. The error of boundary where combining moving surface fitting with distance-weighted could be analyzed and the heights of boundary was corrected. In allusion to smoothing of DEM bicubic spline or B-spline was used to build DEM again in boundary. At the same time, some experiments was made with five relief-map of 1:50 000 map data. The results were analyzed and evaluated with mean square error. Error of hill DEM generated by the method was the least according to experiment data error of five geomorphy. A more accurate and reasonable method was offered for large area DEM generation.

Key words:digital elevation model(DEM); moving surface fitting; distance-weighted; DEM interpolation

数字高程模型(DEM)是构建虚拟地形环境的重要步骤之一,DEM的精度不仅影响地形可视化的效果,而且更重要的是制约着地形仿真和GIS分析与决策的可信度。随着现代测绘、GIS和VR等技术的发展,地形建模的应用范围越来越广阔。因此,如何快速、准确地进行大区域的DEM建模成为地形仿真和GIS的难点。目前DEM的内插方法很多,有双线性内插、加权平均值内插、曲面拟合内插和样条函数内插等,其中加权平均法和曲面拟合法是虚拟现实地形建模中最常用的两种方法。曲面拟合法精度高、计算方法灵活,但对采样点的要求较高,有时不易满足。加权平均法简单易行,对采样点没有要求,但精度稍低、光滑性较差。所以单纯用任何一种插值方法

对整个区域构建DEM都有局限性,要么不能准确表达整个区域的地表形态,要么模型构建的精度达不到要求,这就会影响模型的适用性和精确性。针对上述问题,以移动曲面拟合法与加权平均法建模为实例,在分析其算法特点的基础上,提出将移动曲面拟合法与加权平均法相结合的方法,来解决大区域DEM建模中存在的问题,为今后地形仿真和GIS中大场景3维建模提供参考。

1 曲面拟合和加权平均法的DEM内插算法

1.1 基本思路

首先对研究区域在2维平面上进行网格划分(网格的大小取决于DEM的应用目的),形成覆盖整个区域的规则网格空间结构;然后利用分布

收稿日期:2006-10-21;修回日期:2006-12-28

基金项目:信息工程大学测绘学院课题资助(Y0606)

作者简介:潘攀(1979—),男,河南新乡人,助理工程师,硕士生,研究方向为战场环境仿真。

在格网点周围的地形采样点内插计算格网点高程值。计算格网点的高程值时,先在待插的格网点周围进行八方向搜索,对满足移动曲面拟合的点进行曲面拟合插值;对于不满足条件的点,根据搜索到的现有点利用加权平均法进行插值;最后,利用双三次样条或 B 样条函数进行接边处理。

1.2 曲面拟合法内插格网点高程值

根据 DEM 建模需求确定格网大小,进行格网划分,建立覆盖整个区域的规则格网空间结构。

1) 以待定点 P 为圆心, R 为半径(如图 1 所示)取参考点,凡是落在圆内的数据点即被选用。选择点数根据采用的局部拟合函数来确定。若选择的点数不够时,增大 R 的数值。

2) 为了计算方便,内插时对 DEM 的每一个格网点 $P(X_P, Y_P)$,均将坐标原点移至该点。

$$\begin{cases} \bar{X}_i = X_i - X_P \\ \bar{Y}_i = Y_i - Y_P \end{cases} \quad (1)$$

3) 适合地表的拟合曲面通常为低次多项式(二次或三次),所以选二次曲面作为拟合曲面,函数表达如下:

$Z_i = AX_i^2 + BX_iY_i + CY_i^2 + DX_i + EY_i + F$
式中, $X_i, Y_i, Z_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 是各参考点的坐标值, A, B, C, D, E, F 为待定参数。对应的误差方程为

$$v_i = \bar{X}_i^2 A + \bar{X}_i \bar{Y}_i B + \bar{Y}_i^2 C + \bar{X}_i D + \bar{Y}_i E + F - Z_i \quad (2)$$

由 n 个数据点列出的误差方程为

$$v = MK - Z$$

式中

$$v = \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ \vdots \\ v_n \end{bmatrix}; \quad K = \begin{bmatrix} A \\ B \\ \vdots \\ F \end{bmatrix}; \quad Z = \begin{bmatrix} Z_1 \\ Z_2 \\ \vdots \\ Z_n \end{bmatrix}$$

$$M = \begin{bmatrix} \bar{X}_1^2 & \bar{X}_1 \bar{Y}_1 & \bar{Y}_1^2 & \bar{X}_1 & \bar{Y}_1 \\ \bar{X}_2^2 & \bar{X}_2 \bar{Y}_2 & \bar{Y}_2^2 & \bar{X}_2 & \bar{Y}_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \bar{X}_n^2 & \bar{X}_n \bar{Y}_n & \bar{Y}_n^2 & \bar{X}_n & \bar{Y}_n \end{bmatrix}$$

4) 法化求解。根据平差理论,二次曲面的系数的解为

$$X = (M^T P M)^{-1} M^T P Z$$

式中, P 为权重矩阵,考虑到采样点离内插点 P 的距离不同而相关程度不同,可以采用不同的权重 P_i , n 个采样点即构成 $n \times n$ 的矩阵, P_i 的取定有以下 3 种基本方式:

$$P_i = \frac{1}{d_i}; \quad P_i = \left(\frac{R-d_i}{d_i}\right)^2; \quad P_i = e^{d_i^2 k^2}$$

因为坐标原点移至该 DEM 格网点 $P(X_P, Y_P)$,即 $\bar{X}_P = \bar{Y}_P = 0$,所以系数 F 就是选定点 P 的内插高程值 Z_P 。

1.3 加权平均法补充计算未插值点

由于二次曲面函数是局部函数,有一定的条件约束。(2) 式中有 6 个未知数,至少需要 6 个点,并且这 6 个点均匀分布在待插点的周围,最佳情况是有 8 个以上均匀分布的点(如图 1)。对于区域中等高线特别稀的地方和边界处,参考点少且分布偏向一方(如图 2),此时仍用该算法,计算出的值误差较大。针对这种情况,把该算法与加权平均法相结合,能够解决这个问题。

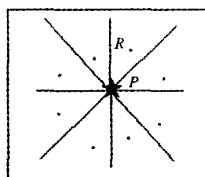


图 1 采样点均匀分布

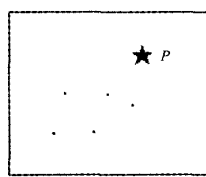


图 2 采样点不均匀分布

加权平均法可以不考虑参考点的分布,仅用权系数即可。加权平均法其实是移动拟合法的特例,它是在解算待定点的高程时,使用加权平均值代替误差方程为

$$Z_P = \left(\sum_{i=1}^n P_i Z_i \right) / \left(\sum_{i=1}^n P_i \right); \quad P_i = 1/r^2$$

其中, Z_P 是待定点 P 的高程; Z_i 是第 i 个参考点的高程; n 为参考点的个数; P_i 是第 i 个参考点的权重;这里权系数采用距离平方的倒数。

为了加快计算速度,提高建模效率,在复杂的曲面拟合运算前对搜索到的参考点进行了判断和预处理。先判断周围参考点的高程之差是否大于 2 m,若不大于 2 m,直接对参考点取平均值作为待插点的高程;反之,用二次曲面函数求解。另外,还有距离判断,若待插点距某参考点不足 0.2 m,直接用该参考点的高程值。通过试验证明,这两种处理方法比用二次曲面函数所求的值精度高、速度快,大大提高了建模的效率。

1.4 接边处理

如果对大区域 DEM 建模进行分块处理,不同分块采用不同建模算法势必会带来分块间接边问题。即对于相同高程的格网点采用不同数学模型,会计算出不同高程值,这样就影响了 DEM 的光滑性和精确性。对于上述两种方法建模的接合处,存在接边问题,但影响不大。因为引入加权平

均就是为了减小误差,弥补曲面拟合的不足。若该算法的精度不满足要求可在误差分析后进行误差改正。针对接边处 DEM 存在不光滑的问题,此处是采用双三次样条函数和 *B* 样条函数来解决的。

2 试验与分析

2.1 实验

基于提出的方法,分别用 1:5 万高山、冰川、丘陵、中山、黄土地貌等高线数据进行建模试验,格网大小为 8 m,同时对模型的精度进行了分析和评估。冰川和中山地貌的试验结果如图 3、图 4 所示。评估的结果见表 1、表 2 和图 5、图 6。

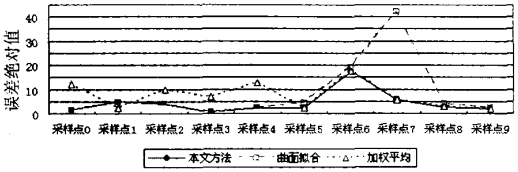
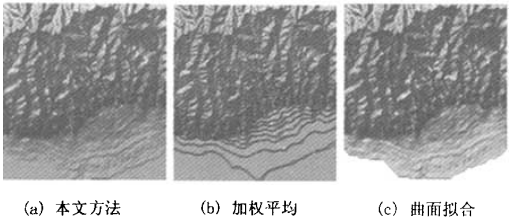
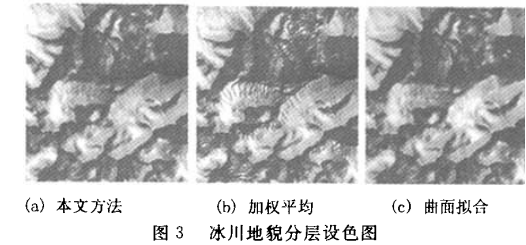


图 5 冰川地貌 DEM 误差示意图

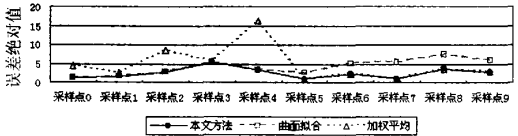


图 6 中山地貌 DEM 误差示意图

表 1 冰川地貌 DEM 精度评估

坐 标		高程/m	本文方法		曲面拟合		加权平均	
X	Y		高程/m	误差/m	高程/m	误差/m	高程/m	误差/m
830.134 2	23.094 5	3 580	3 581.73	1.73	3 581.73	1.73	3 592.22	12.22
970.702 1	258.108 5	3 580	3 576.09	-4.91	3 576.09	-4.91	3 577.55	-2.45
758.748 1	39.405 2	3 580	3 576.93	-4.07	3 576.93	-4.07	3 589.71	9.71
753.321 1	25.382 0	3 540	3 540.93	0.93	3 540.93	0.93	3 546.80	6.80
578.556 6	20.937 6	3 540	3 542.30	2.30	3 542.30	2.30	3 552.78	12.78
998.914 6	271.111 5	3 580	3 582.35	2.35	3 584.67	4.67	3 582.35	2.35
2.408 0	37.214 9	3 520	3 537.73	17.73	3 500.85	-19.15	3 537.73	17.73
580.069 5	996.006 5	3 660	3 665.75	5.75	3 701.97	41.97	3 665.75	5.75
834.769 9	999.137 6	3 500	3 502.73	2.73	3 504.00	4.00	3 502.73	2.73
440.341 8	850.909 3	3 800	3 801.91	1.91	3 802.50	2.50	3 801.91	1.91
中误差			S=6.43		S=14.91		S=9.07	

表 2 中山地貌 DEM 精度评估

坐 标		高程/m	本文方法		曲面拟合		加权平均	
X	Y		高程/m	误差/m	高程/m	误差/m	高程/m	误差/m
322.516 8	244.086 6	440	441.39	1.39	441.39	1.39	444.31	4.31
492.055 0	352.666 6	580	581.57	1.57	581.57	1.57	582.56	2.56
546.183 9	673.246 2	860	862.88	2.88	862.88	2.88	868.45	8.45
733.373 3	720.830 0	1 120	1 125.51	5.51	1 125.51	5.51	114.42	-5.58
309.979 6	537.822 9	1 040	1 043.25	3.25	1 043.25	3.25	1 056.05	16.05
432.231 7	952.973 9	1 500	1 488.92	-1.08	1 487.33	-2.67	1 488.92	-1.08
1.665 8	230.080 9	380	382.32	2.32	374.91	-5.09	382.32	2.32
998.315 6	397.264 2	440	441.05	1.05	445.26	5.26	441.05	1.05
245.668 0	1 000.673 3	1 640	1 643.65	3.65	1 632.48	-7.52	1 643.65	3.65
2.789 0	470.614 0	940	937.28	-2.72	934.09	-5.91	937.28	-2.72
中误差			S=2.86		S=4.54		S=6.43	

2.2 分析

为了形象表示出 3 种方法的优劣,用 3 维格

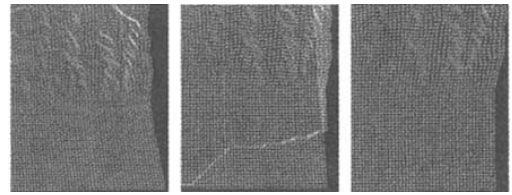
网显示了中山地貌 DEM 右下角处,如图 7 所示。分析说明以下 4 点。

1) 从表 1、表 2 以及图 3~图 6 可以看出,所提出的方法与单纯用加权平均法和移动曲面拟合插值法相比,精度高、光滑性好。从几种地貌的实验数据误差来看,丘陵地貌 DEM 的建模用所提出的方法中误差最小。

2) 图 7(a)融合了两种算法的优点,较好地表达出地貌形状。通过本次实验可知,DEM 插值算法很多,可以采用多种算法融合进行建模,使它们能够互相取长补短,但在同一区域建模方法不易过多,两三种即可。

3) 从图 7(b)可以看出,右下角处采样点不足,如果采用曲面拟合插值,格网点高程为空,为了能让这部分更好地显示出来,将不满足条件的格网点统一赋高程值(-1),此时,可以看出右下角处有一塌陷,此处形状与图 4 右下角空白处相对应。产生这一问题的原因是由于采样点的个数,此次试验选取采样点的个数大于 6,这是由二次曲面系数个数和平差理论所决定的。当数据点稀疏或分布不均匀时,利用二次曲面拟合就会产生较大的误差,这是因为解的稳定性取决于法方程的状态,而法方程的状态与点位分布有关。

4) 图 7(c)是用加权平均法试验的结果。从图 7(c)可以看出,图区上半部分没有表达出地形起伏的各种细节层次。这是由于加权平均法对采样点的数量和分布没有要求,容易满足条件,也是该算法精度不高的直接原因。因此,把该算法用于大区域 DEM 建模,容易产生“梯田”现象。



(a) 所提方法 (b) 加权平均 (c) 曲面拟合

图 7 中山地貌 DEM 右下角 3 维格网显示效果图

3 结论

尝试用曲面函数与加权平均相结合的方法来解决大区域 DEM 建模问题。实验证明,该方法可行的并取得较好效果,这为今后大区域 3 维建模提供借鉴方法。本次实验侧重于建模方法和精度评价研究,对建模的时效性没有作具体研究,这也是需要进一步研究的问题。

参考文献:

- [1] 李志林,朱庆. 数字高程模型[M]. 武汉:武汉测绘科技大学出版社,2001:134-136.
- [2] 高俊,夏运钧,游雄,等. 虚拟现实在地形环境仿真中的应用[M]. 北京:解放军出版社,1999:101-104.
- [3] 汤国安,刘学军,闫国年. 数字高程模型及地学分析的原理与方法[M]. 北京:科学出版社,2005:89-93.
- [4] 吴立新,史文中. 地理信息系统原理与算法[M]. 北京:科学出版社,2003:186-189.
- [5] 蔺爱军. 利用二次曲面移动拟合法进行 DEM 内插的精度探讨[J]. 测绘技术装备,2003,5(2):23-25.

责任编辑 安敏

(上接第 56 页)

参考文献:

- [1] 孟丽秋. 地图技术发展中的几点理论思考[J]. 测绘科学技术学报,2006,2(4):89-97.
- [2] Ben Shneiderman. 用户界面设计[M]. 北京:电子工业出版社,2004:152-188.
- [3] 凌云. 地图可视化系统自适应用户界面的研究[D]. 郑州:信息工程大学测绘学院,2005.
- [4] 张琴,李乐山,马瑞芳. 基于认知心理学的计算机图标研究[J]. 微电子学与计算机,2004,(10):126-130.
- [5] 李乐山. 人机界面设计[M]. 北京:科学出版社,2004:43-123.
- [6] 王德胜. 科学符号学[M]. 沈阳:辽宁大学出版社,1993:61-92.
- [7] Gombrich E H. 图像与眼睛[M]. 杭州:浙江摄影出版社,1988:167-199.
- [8] Chen Peter P. Toward a Methodology of Graphical Icon Design[A]. Proceedings of the IEEE Fifth International Symposium on Multimedia Software Engineering (ISMSE'03)[C]. 2003.
- [9] Michael D Fleetwood, Michael D Byrne. Modeling Icon Search in ACT-R/PM[J]. Cognitive Systems Research, 2002,(3):25-33.
- [10] Chang S K, Polese G. A Methodology and Interactive Environment for Iconic Language Design[J]. International Journal of Human-Computer Studies, 1994,41:683-716.

责任编辑 安敏