# 单点移面算法建立 DEM 及其精度的讨论

凌冬冬，杨镇华，史巍巍
（合肥炮兵学院五系四十一队，安徽 合肥 230031）

摘 要：数字高程模型是 GIS 系统的重要组成部分，高程内插是其中的关键技术。本文研究了顾及方向的单点移面的内插算法，构建了一个较为合理的权函数，给出了误差计算公式。

关键词：DEM；移面内插；精度；误差
中图分类号：TP301 文献标识码：A 文章编号：1009-3044(2006)05-0103-02

The Simple Point Migration Area Algorithm Establishes DEM and Its the Precision Discussion

LING Dong-dong, YANG Zhen-hua, SHI Wei-wei
(The Hefei Artillery Institute Five is 41 Rows,Hefei 230031,China)

Abstract:DEM is one of the important parts of the GIS,Altitude interpolation is the key technical issue in DEM.In this text,the method of single point change surface interpolation containing orientation in DEM is studied,a more reasonable function with power is given out,and the error margin calculation formula is also given out.

Key words:DEM;change surface interpolation;Accuracy;Error

## 1 前言

数字高程模型是 DEM 的全称，它最初是由美国麻省理工学院 Miller 教授为高速公路自动设计于 1956 年提出来的，随着各种相关技术的发展，DEM 现在已经成为 GIS 系统的基本要素。由于数字高程模型在实际的应用十分广泛，如：其在测绘中可用于绘制等高线、坡度坡向图、立体透视图、制作正射影像图和地图的修测；在遥感中可作为分类的辅助数据，它是地理信息系统的基础信息，可用于土地利用现状的分析、合理规划及洪水险情预报等；在军事上可用于电子地图、沙盘、导航及导弹制导；因此对它的研究就显得很有意义。DEM 是数字地图的重要组成部分，它实际上表示区域 D 上地形的三维向量的有限序列 $\{V_i=(x_i,y_i,z_i),i=1,2,\cdots\cdots,n\}$，其中 $(x_i,y_i)$ 是 D 的平面坐标，$Z_i$ 是 $(x_i,y_i)$ 处的高程。从数学的角度来说高程模型是高程 Z 关于平面坐标 X，Y 两个自变量的连续函数，数字高程模型只是它的一个有限的离散的表示。从广义上说数字高程模型包括规则格网、三角网、等高线等高程的数字表示。

本文主要讨论了在选用逐点内插法中的单点移面算法建立距离权模型中存在的缺点，提出了改进的方法，并给出了误差精度的求取公式。

## 2 现有主要内插方法介绍

从前言介绍中我们知道 DEM 是一种有限的离散表示，它主要是通过已知的离散点求取网格点的高程，所以建立 DEM 的核心技术就是内插算法的研究。DEM 的内插算法有很多常用的包括：单点移面内插法、样条函数插值、随机分形递归算法、有限元内插算法和辐射搜索法等众多算法。按内插点的分布范围，可以将内插分为整体内插、分块内插、逐点内插三类。

整体内插的拟合模型是由研究区域内所有采样点的观测值建立的，它主要通过多项式函数来实现，因此又称整体函数法内插。这些函数模型的特点是不能提供内插区域的局部特性，因此常被用于模拟大范围的宏观变化趋势。整体函数内插法的优点是易于理解。简单地形特征因为参考点比较少，选择低次多项式来描述就可以了。但当地貌复杂时，需要增加参考点的个数。选择高次多项式固然能使数学面与实际地面有更多的重合点，但由于多项式是自变量幂函数的和式，参考点的增减或移位都需对多项式的所有参数做全面调整，从而参考点间会出现难以控制的振荡现象，使函数极不稳定。另外，整体内插法中需要解求高次的线性方程组，参考点测量误差的微小扰动都可能引起高次多项式参数的很大变化，使高次多项式插值很难得到稳定解。因此 DEM 内插中一般不用整体函数内插，而采用局部函数内插即分块内插较宜。

分块内插是把参考空间分成若干分块，对各分块使用不同的函数，这时的问题是要考虑各相邻分块函数间的连续性问题。分块的大小根据地貌复杂程度和参考点的分布密度决定，一般相邻分块间要求有适当宽度的重叠，以保证相邻分块间能平滑、连续地拼接。典型的局部内插有线性内插、局部多项式内插、双线性多项式内插或样条函数内插等，基于 TIN 和正方形格网的剖分法双线性内插是 DEM 分析与应用中最常用的方法。分块内插的分块范围在内插过程中一经确定，其形状、大小和位置都保持不变，凡落在分块上的待插点都用展铺在该分块上的唯一确定的数学面进行内插。

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移动，因此又称移动曲面法。选择邻近点一般考虑两个因素：范围和点数。在一般的选点方式中，存在一个很重要却经常被忽略的问题：即参考点坐标或参考点所在坐标系统的微小变化都会使选点结果差别很大，结果可能造成数字高程模型表面的不连续。造成这个问题的原因在于仅以距离为基础进行选点和定义权重，而事实上距离难以很好地描述空间相邻性，因此就需要我们在选取时加入对方向因素的考虑，提高建模的精度。

所以从上面的介绍我们可以看出，在 DEM 的建立中没有一种满足所有要求的通用算法，这就要求我们在建立数字高程模型时应根据具体情况来选择算法。考虑到军事应用上在对内插算法速度和效果的要求，尤其是电子沙盘和战场仿真系统对 DEM 数据精度和逼真性的要求，本文采用逐点内插算法中单点移面的内插算法。必要时在局部可以采用 TIN 插入表示其地形细节。这样可以满足建模速度的要求，也克服了误差因素影响使曲面可能不连续的情形。

## 3 距离权内插模型的建立

当采用距离幂次法估值时，高程 Za 的估计值 Za′为：

收稿日期：2005-12-26

作者简介：凌冬冬，安徽合肥人，炮兵学院五系四十一队，研究方向：计算机图形图象；杨镇华，安徽合肥人，炮兵学院五系四十一队，研究方向：计算机图形图象；史巍巍，安徽合肥人，炮兵学院五系四十二队，研究方向：计算机图形图象。



© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

$$Za' = \sum_{i=1}^{n}\left(Zi/di^{m}\right)\Big/\sum_{i=1}^{n}\left(1/di^{m}\right) \quad (1)$$

式中,di 为已知点到待定点的距离;m 为距离的幂次,当 m 取 1 和 2 时,则分别表示距离反比法和距离平方反比法。

注意到若 di = 0 或很接近于 0 时,一方面舍入误差和截断误差将引起很大误差;另一方面,计算机计算也会产生很大困难 ,此时可能得不到一个连续曲面,这在高程内插中是不允许的。

当然上述问题可以这样解决:选取一个适当的 ε,高程 Za 的估计值 Za′ 按下式计算:

$$Za' = \begin{cases} \sum_{i=1}^{n}\left(Zi/di^{m}\right)\div\left(\sum_{i=1}^{n}\left(1/di^{m}\right)\right) & di > \varepsilon \\ Zi & di \le \varepsilon \end{cases}$$

这样做首先有悖于非参数统计理论。从直观上也可以看出,当高程观测值的随机误差较大时, 内插值也会有较大的误差,有可能得不到一个光滑的曲面。

为此,可以采用如下估值权函数:

$$\lambda i = \lambda^{-kD_i^{\alpha}}\Big/\sum_{i=1}^{n}\lambda^{-kD_i^{\alpha}} \quad (2)$$

式中,其中 $D_i=d_i\div T$,$d_i$ 为 i 点到待定点的距离,T 为常数(如 T 可取观测值均值),k,α 为待定常数,一般 k 可取小于 1 的正数,α 可取 1 或 2。

该权函数具有如下特性:

(1)当 di= 0 时,λi= 1 而不为 0 ,这是一般的以距离为幂的权函数所没有的优点。

(2)若取 k = 0,则 λi 均为 1,此时相当于取算术平均值,各观测值对待定点的估值贡献一样大。

(3)当 k 取值一定时,内插值一般不会由于移动区间半经的增大而出现显著的变化。如 k= 0.43,用 5 点内插与用 13 点、17 点内插效果差不多。该特性的意义在于,当寻求最佳 k 值或用该法进行内插时,可以将移动半经取得稍大一些而不必考虑移动半径的影响,计算简单方便。

(2)式克服了 d-m 权函数的缺点。可以证明,其估计曲面始终是连续的,而且光滑性要优于后者,同时也可节省计算时间。

不过,对于已知点分布很不规则时,(2)式在实际应用中还是存在着一些不足,因它还没有充分考虑到已知点分布状态对待定点的估值影响。即尚未考虑权函数除了与距离有关外,还应与方向有关。

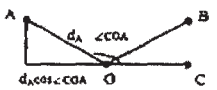
由上可知若只考虑距离因素,估计点的高程时,三个已知点的权都是一样的,这显然是不合理的。上述问题引起了人们的注意,并提出了如下考虑方向因素的距离幂次法内插估计公式:

$$\begin{cases} Za' = \sum_{i=1}^{n}\lambda iZi \\ \lambda i = Ui di^{-m}\Big/\left(\sum_{i=1}^{n}Ui di^{-m}\right) \end{cases} \quad (4)$$

其中,Ui 为影响角系数,Ui =αi/360°,αi 为影响角度, 某一已知点的影响角度为该点与其前后两已知点间夹角之半的和。但其至少存在两方面的不足:(1)没有考虑高程的空间特性;(2)已知点分布对待定点的估值影响不仅与分布状态本身有关, 而且应与 DEM 数据的特性有关。下面建立考虑已知点分布状态的权函数式。

可知,某一已知点对待定点的影响应随两点间距离增大而减小,同时若该已知点与其它所有已知点关系密切,影响应相对小些,反之应大一些。(如下图)设我们正考虑 C 点对待定点 O 的影响,从图中可见,A 点与 C 点的关系不如 B 点对 C 点的关系密切,A 点与 C 点的关系可以通过 AO 在 CO 上的投影反映出来, 即 d Acos∠COA 越大, 二者关系越密切 (如下图)。换言之 ,d A – d Acos∠COA 越大,关系越不密切,这样 C 点与内插估计邻域内其它所有已知点的关系密切程度可用下式反映:

$$W_c^0 = \sum_{I=1,I\neq C}^{n} di\left(1-\cos\angle COI\right)$$




已知点间密切程度的确定

为了排除距离的影响 , 可将上式除以 ΣnI=1,I≠Cdi 即得无量纲数 Wc:

$$Wc = \sum_{I=1,I\neq C}^{n} di\left(1-\cos\angle COI\right)\Big/\sum_{I=1,I\neq C}^{n} di$$

若 $W_C$ 越大, 表示 C 点与内插估计邻域内其它所有已知点的距离密切程度越低,则 C 点对待定点 O 的影响也就越大;反之密切程度越高,则对待定点的影响也就越小。考虑到 DEM 数据的特性,则兼顾已知点分布状态及距离的权函数为:

$$\lambda i = di^{-m}\left(1+\beta W_i\right)\Big/\sum di^{-m}\left(1+\beta W_i\right) \quad (5)$$

$$\lambda i = \lambda^{-kD_i}\left(1+\beta W_i\right)\Big/\sum \lambda^{-kD_i}\left(1+\beta W_i\right) \quad (6)$$

$$\lambda i = \lambda^{-kD_i^{2}}\left(1+\beta W_i\right)\Big/\sum \lambda^{-kD_i^{2}}\left(1+\beta W_i\right) \quad (7)$$

式中,Di,di,k 的含义同(3)式,Wi 仅与已知点的分布状态有关, 根据已知点的坐标即可求得,0≤ Wi≤ 2 ;β 与地形特征有关,当 β = 0 时,(5)式即变为距离幂次法中的内插估计值公式(见(2)式),它表示已知点分布状态对估值没有影响,β 越大,表示影响越大,它需用类似于寻找优化幂的方法求得。在实际应用中,需根据具体情况,恰当地选取以上的权函数以用于 DEM 的内插。

## 4 DEM 建模的误差

由于文中采用的是距离权来建立模型的,所以其误差主要是坐标转换的误差、距离权误差和数据计算误差三种主要误差,其中的距离权误差即为逼近误差。考虑数据获得时测量、读取等误差可以得到 DEM 误差的总公式为:△DEM=△数据+△逼近。其中等式右边第一项为原始数据误差。现在我们主要分析下第二项逼近误差。由公式(4):$Za'=\sum_{i=1}^{n}\lambda_iZ_i$ 考虑到坐标转换误差是累积的我们可以得到误差计算公式:$\Delta Za' = \varepsilon\sum_{i=1}^{n}\lambda i\left(\Delta Zi + Zi\right) - \varepsilon\sum_{i=1}^{n}\lambda iZi$ ;是坐标转换误差,是坐标高程误差。但是在实际中我们知道权值在计算确定时其也会有误差,首先权值不是对每个待定点都是最合适的,它只能是满足适合多数待定点的高程值的计算。其次从上面的公式(6)、(7)中我们可以发现权值在计算确定时也会有误差产生。若我们用公式(7)来计算权值,可得:

$$\Delta\lambda_i' = \lambda^{-k\left(D_i+\Delta D_i\right)^2}\left(1+\beta W_i\right)\Big/\sum\lambda^{-k\left(D_i+\Delta D_i\right)^2}\left(1+\beta W_i\right) - \lambda^{-kD_i^2}\left(1+\beta W_i\right)\Big/\sum\lambda^{-kD_i^2}\left(1+\beta W_i\right) \quad (8)$$

其中 $D_i=d_i\div T$,$d_i$ 为 i 点到待定点的距离,T 为常数 (如 T 可取观测值均值),k 为待定常数。考虑到权值选取的系统误差 △λi′′,最后我们可以得到公式:

$$\Delta\lambda_i=\Delta\lambda_i'+\Delta\lambda_i'' \quad (9)$$

将其带入误差计算公式我们最终可得单点移面算法的误差公式为:。当然这里给出的误差计算公式还是有待改进的。在实际中我们检查 DEM 数据的精度时, 我们不会采取这种比较烦琐耗时的方法,相对来说回放等高线对比不失为一种快速、准确、有效的检查方法。

## 5 总结

现在 DEM 的应用已经十分广泛,但是由于地形表面的复杂

(下转第 138 页)



© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

件中包含了这样一个动态链接库 APIGUIDE.DLL，该动态链接库提供了一些函数和过程可直接访问微机的 I/O 端口，这些函数和过程如表 1 所示。

表 1 端口 I/O 函数和过程

| 函数 | 说明 |
|---|---|
| aginp | 从 I/O 端口输入一个字节 |
| aginw | 从 I/O 端口输入一个 16 位整数 |
| agoutp | 从 I/O 端口输出一个字节 |
| agputw | 从 I/O 端口输出一个 16 位整数 |

在所用的函数和过程及该动态链接库在 VB 中做了声明后，这些函数和过程就可直接被调用。

以上函数及过程声明如下：

```
Declare Function aginp% lib "Apiguide.dll"(Byval portid%)
Declare Function aginpw% lib "Apiguide.dll"(Byval portid%)
Declare Sub agoutp% lib "Apiguide.dll"(Byval portid%,Byval outval%)
Declare Sub agoutpw% lib "Apiguide.dll"(Byval portid%,Byval outval%)
```

2.2 实时控制程序

具体编写程序时，要根据 PM511P 数据采集卡的各个寄存器的地址来进行读写操作。PM511P 数据采集卡的端口地址和功能如表 2 所示。

表 2 端口地址与功能

| 端口操作地址 | 读操作 | 写操作 |
|---|---|---|
| 基地址+0H | 启动 A/D 转换 | A/D 通道输出/单双端选择 |
| 基地址+1H | 状态寄存器 | A/D 转换方式与中断控制寄存器 |
| 基地址+2H | 读 A/D 转换结果*溢中断标志位 | A/D 定时启动分频系数 |
| 基地址+4H | / | 输出 D/A 通道 |
| 基地址+6H | / | 输出 D/A 数据* |

## 3 实例

本例是一个小型的液位控制系统，在实时控制界面里执行实时控制程序，并且可以调用另外一个窗体观察实时的液位。使用 VB 里的定时器 Timer 控件定时采样，并实时处理数据。其中输出的控制量是通过一定算法计算得到的，此算法综合了现代控制理论和数值计算方法。

```
Public h1 As Integer, h2 As Integer
Private Declare Function aginp Lib "Apiguide.dll" (ByVal portid)
Private Declare Function agoutp Lib "Apiguide.dll" (ByVal portid)
Private Sub Command1_Click() ' 调用时钟程序
Timer1.Enabled = True
Timer1.Interval = 3000
End Sub
Private Sub Command2_Click() ' 调用 Form3 水位显示界面
Unload Me
Form3.Show
End Sub
Private Sub Timer1_Timer()
Dim p1, p2, lb1, hb1, lb2, hb2, ad1, ad2, h1, h2, F, hb, lb As Integer
Dim h1a, h2a, X, v1, v2 As Double
bas% = 100H ' 基地址
agoutp (bas + 1), 0 ' 选择软件启动 A/D 转换方式
agoutp (bas + 0), 16 ' 选择输入通道
aginp (bas + 0) ' 启动 A/D
sample1: p1 = aginp(bas + 1) ' 查询 A/D 转换状态
p1 = p1 And 1
If p1 <> 0 Then GoTo sample1
lb1 = aginp(bas + 2) ' 读入低位
hb1 = aginp(bas + 3) ' 读入高位
hb1 = hb1 And 15 ' 屏蔽高四位
ad1 = hb1 * 256 + lb1
v1 = ad1 / 4095 * 10 ' 电压值
h1a = v1 / 10 * 100
h1 = Int(h1a) ' 液位值
agoutp (bas + 1), 0 ' 选择软件启动 A/D 转换方式
agoutp (bas + 0), 17 ' 选择输入通道
aginp (bas + 0) ' 启动 A/D
sample2: p2 = aginp(bas + 1) ' 查询 A/D 转换状态
p2 = p2 And 1
If p2 <> 0 Then GoTo sample2
lb2 = aginp(bas + 2) ' 读入低位
hb2 = aginp(bas + 3) ' 读入高位
hb2 = hb2 And 15 ' 屏蔽高四位
ad2 = hb2 * 256 + lb2
v2 = ad2 / 4095 * 10 ' 电压值
h2a = v2 / 10 * 100
h2 = Int(h2a) ' 液位值
X =40+2*40
F = Int(- 246 * h1a - 321 * h2a + 2 * X) ' 求阀门开度值
hb = Int(F / 256) ' 高位值
lb = ou - hb * 256 ' 低位值
agoutp (bas + 4), 0 ' 选择输出通道
agoutp (bas + 6), lb ' 输出低位值
agoutp (bas + 7), hb ' 输出高位值
End Sub
Private Sub Form_Load() ' 实时显示水位值
Text1.Text = Form2.h1
Text2.Text = Form2.h2
End Sub
```

## 4 结束语

此程序已调试通过，并且得到应用，一经掌握后可以方便第扩展到 A/D、D/A、定时、中断等功能的实现。在 Visual Basic 环境下，利用数据采集卡可以实现数据采集、信号控制和处理控制输出等多种功能。

## 参考文献：

[1]罗朝盛.Visual Basic 6.0 程序设计教程第二版[M].人民邮电出版社,2005.

[2]张强.用 Visual Basic 调用 DLL 的方法及注意问题[J].微型计算机应用,1997.3:55-57.

[3]郭勇,程红.Visual Basic 与 Windows API 接口大全[M].电子工业出版社,1995.

(上接第 104 页)

性和多变性，一种内插算法多数情况下，只能适用于特定的地形类型。本文选取对于距离权建模内插算法的改进，就是为了针对地形平缓、采样点较少时的情况。同时在选取内插算法时还应考虑数据量的大小和计算机的处理速度，对于精度要求较高的情况下，还要加入对地性线的因素考虑。

## 参考文献：

[1]武胜林,孔学礼,刘文楷.《DEM 中顾及方向的单点移面内插法》《测绘科学》2001 年 6 月.

[2]罗冀华.《建立 DEM 快速算法分析》《测绘科学》2003 年 12 月.

[3]李志林,朱庆.《数字高程模型》武汉测绘科技大学出版社.

[4] 潘秀宝.《距离加权法优化幂指数的确定》《有色矿山》1985 年 6 月.

[5]史文中.《空间数据误差处理的理论与方法》科学出版社,1998.



© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net