

《摄影测量学》第七章

数字高程模型及其应用

航空摄影测量作业

航空
摄影



获取航空影像

外业
控制



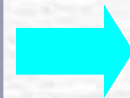
像控测量获取GCPs

像片
量测



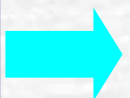
影响匹配量测连接点
人工观测量测控制点

空三
加密



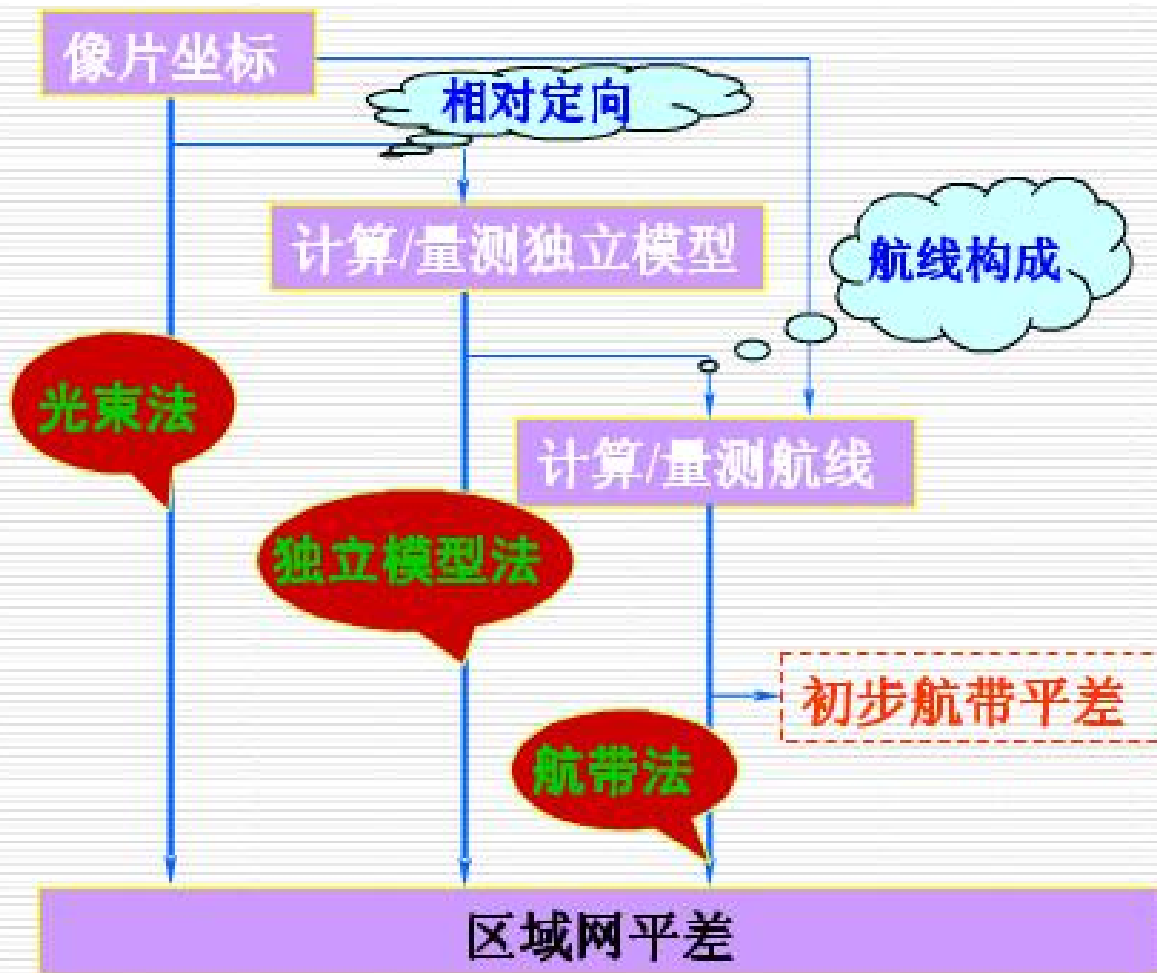
区域网平差
解算像片外方位元素
计算地面点坐标

内业
成图



获取4D等摄影测量产品

解析空中三角测量



□ 航带法

解求航线的非线性
改正参数

□ 独立模型法

解求模型的相似变
换参数

□ 光束法

解求像片的外方位
元素及物点坐标

总结：三种平差方法比较

平差方法 比较项目	航带法	独立模型法	光束法
平差单元	航带	单元模型	单张像片（光束）
观测值	各点概略地摄坐标	模型坐标	像点坐标
未知数	各航带非线性变形改正系数	各模型空间相似变换参数及加密点坐标	各像片外方位元素及加密点坐标
平差数学模型	多项式	空间相似变换公式	共线方程
原理	近似	严密	最严密
精度	低	高	最高
应用	小比例尺低精度加密	测图加密	低级大地测量三角网及高精度数字地籍测量测量地界点

7.1 概述

7.2 数据预处理

7.3 数字高程模型数据内插方法

7.4 数字高程模型的数据存储

7.5 数字高程模型应用算法

概述

数字地面模型DTM (Digital Terrain Model) Miller教授1956年提出来。用于各种线路(铁路、公路、输电线)的设计、各种工程面积、体积、坡度的计算,任意两点间可视性判断及绘制任意断面图。

数字地面模型的概念

- 在模拟摄影测量与解析摄影测量中，通常将地面上的信息（地貌、地物以及各种名称）用图形与注记的方式表示在图纸上，例如用等高线、地貌符号以及必要的数字注记表示地形。用各种不同的符号与文字注记表示地物的位置、形状及特征，这就是常用的地形图，其优点是比較直观，便于人工使用；缺点是不便于管理，特别是无法被计算机直接利用。随着计算机技术和信息处理技术的发展以及生产实践的要求，这种传统的纸载地图将逐渐被数字化产品所取代，其典型产品就是数字地图与数字地面模型。

数字地面模型的概念

数字地面模型DTM:

简单来说用数字形式表示地面信息，在坐标系中以一系列离散点和规则点表示地面形态特征的数据集合，是地形表面形态等多种信息的一个数字表示。DTM是定义在某一区域D上的m维向量有限序列：

$$\{V_i, i=1, 2, \dots, n\}$$

其向量 $V_i = (V_{i1}, V_{i2}, \dots, V_{in})$ 的分量为地形 X_i, Y_i, Z_i ($(X_i, Y_i) \in D$)、资源、环境、土地利用、人口分布等多种信息的定量或定性描述。

数字高程模型的概念

数字高程模型DEM (Digital Elevation Model) 是表示区域D上地形的三维向量有限序列

$$\{ V_i = (X_i, Y_i, Z_i), i=1, 2, \dots, n \}$$

其中 $(X_i, Y_i) \in D$ 是平面坐标, Z_i 是 (X_i, Y_i) 对应的高程.

严格的定义: 指在某一区域上以高程表达地面起伏状态的有序阵列。

DTM的特点

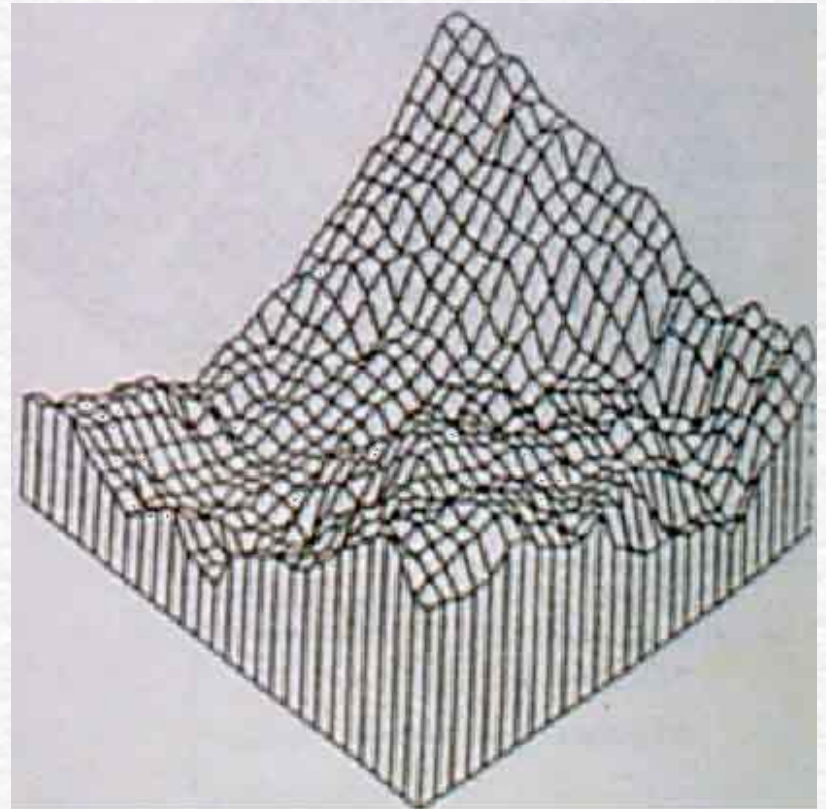
- ✦可直接输入计算机，可供各种计算机辅助设计系统利用
- ✦以多种形式显示地形信息
- ✦精度不会损失
- ✦容易实现自动化、实时化

数字高程模型DEM表示形式

DEM的表示形式，按其结构形式分为规则格网、散点、等值线、曲面、线路、平面多边形和空间多边形等多种数字地面模型。常用的为规则格网，不规则三角网两种（TIN），以及二者的混合。

规则矩形格 (Grid)

利用一系列在X, Y方向上都是等间隔排列的地形点的高程Z表示地形，形成一个矩形格网DEM。



规则矩形格网

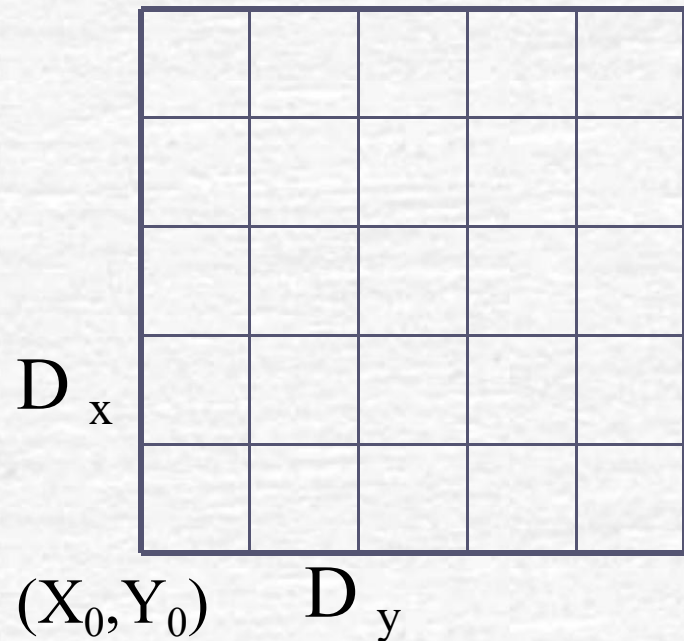
其任意一个点P的平面坐标可根据该点在DEM的行列数*i*、*j*及存放在该DEM文件中的基本信息推算出来。

$$X_i = X_0 + i * DX$$

$$(i = 0, 1, \dots, m)$$

$$Y_j = Y_0 + j * DY$$

$$(j = 0, 1, \dots, n)$$



存储量最小、便于使用管理。缺点是有时不能准确表示地形的结构与细部。

规则格网DEM的优点:

- 数据量小, 便于使用与管理。可以很容易地用计算机系统进行处理, 特别是栅格数据结构的信息系统。它还可以很容易地计算等高线、坡度坡向、山坡阴影和自动提取流域地形, 使得它成为DEM最广泛使用的格式, 目前许多国家提供的DEM数据都是以规则格网的数据矩阵形式提供的。

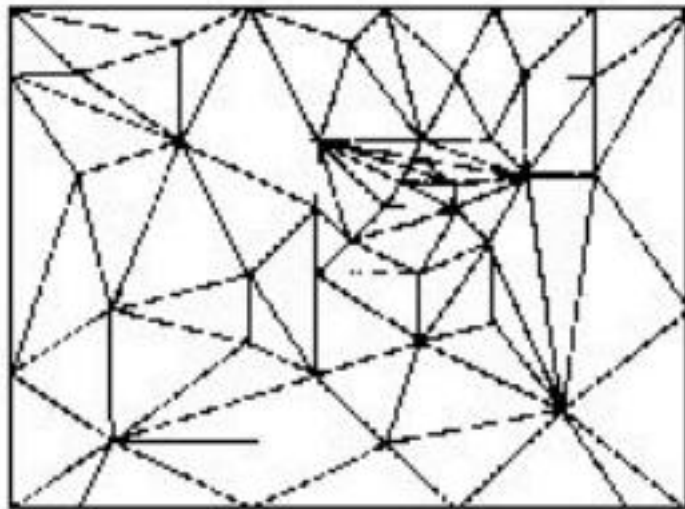
缺点:

- 不能准确表示地形的结构与细部; 格网过于粗略, 不能精确表达某些重要的地形特征, 如山峰、洼坑、山脊、山谷等。
- 如不改变格网大小, 则无法适用于起伏程度不同的地区;
- 在地形简单、平坦的地区存在大量冗余数据;

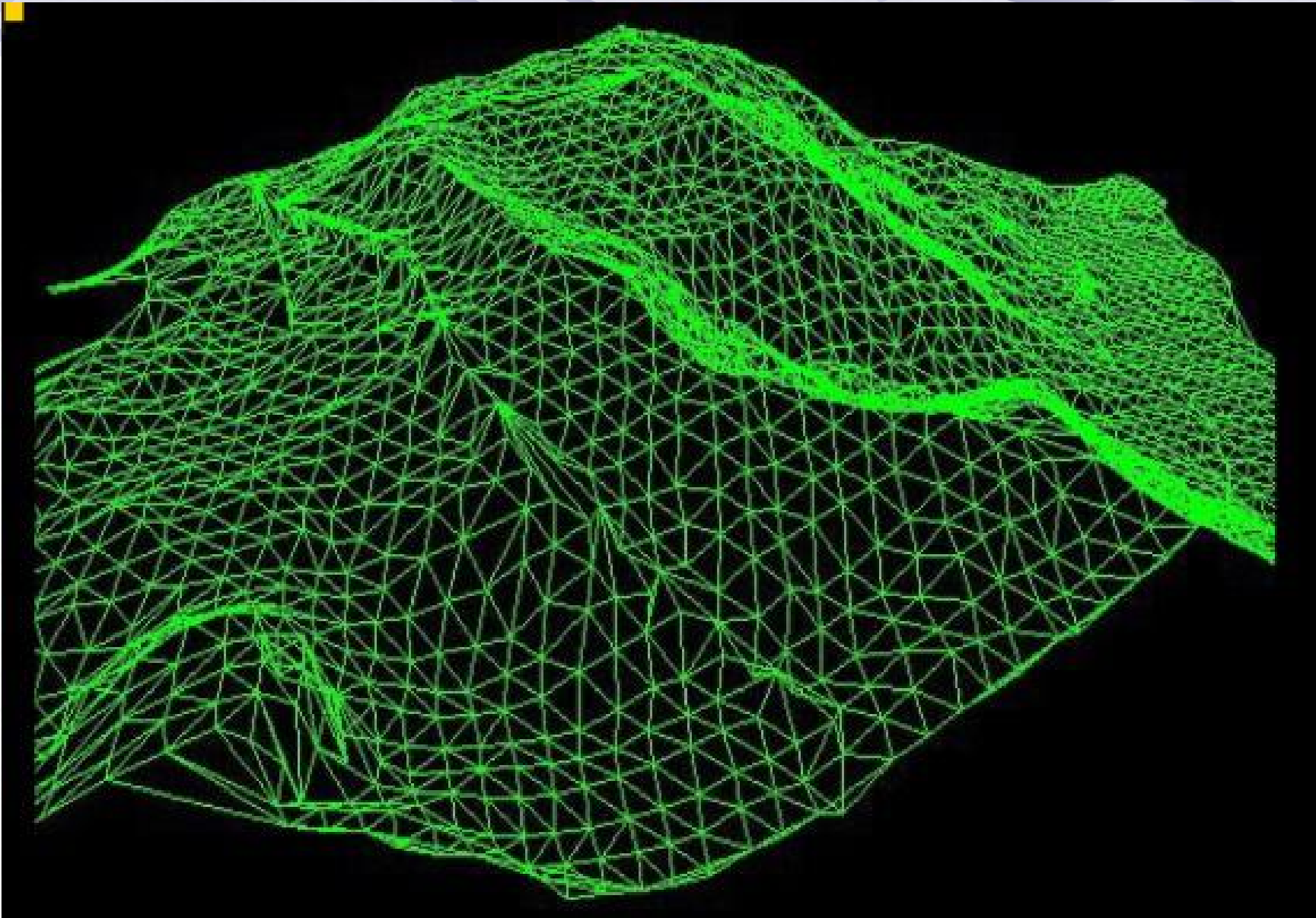
不规则三角网DEM (TIN Triangulated Irregular

Network)

将按地形特征采集的点按一定规则连接成覆盖整个区域且互不重叠的三角形，构成的一个由不规则的三角网表示的DEM。

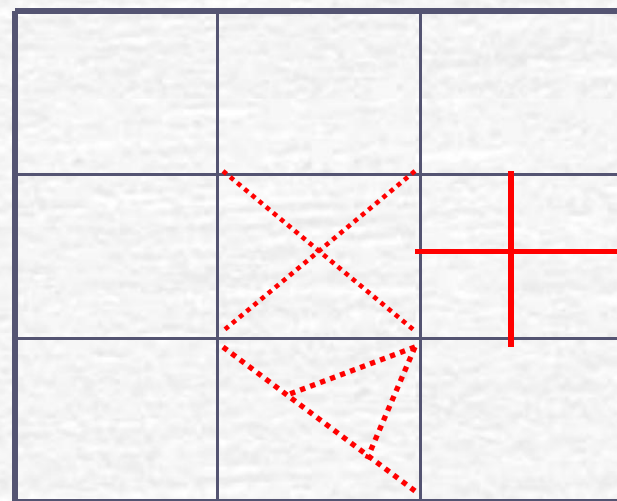


能较好地顾及地貌特征点、线，表示复杂地形表面比矩形格网精确。缺点是数据量较大，数据结构较复杂，使用与管理也较复杂。



Grid-TIN混合网

德国Ebner教授等提出了Grid-TIN混合形式的DEM，一般地区使用矩形网数据结构（根据地形采用不同密度的格网），沿地形特征则附加三角网数据结构



矩形格网三角同混合形式DEM

数字高程模型的数据获取

为了建立DEM，必需量测一些点的三维坐标，被量测三维坐标的这些点称为**数据点**。

DEM的数据采集，有野外常规数据采集、现有地形图数字化、摄影测量法数据采集和由遥感系统直接测得。

1、野外实地测量

利用全自动记录的全站仪在野外实测。这种全站仪一般都有微处理器，它可自动记录与显示有关数据，还能进行多种测站上的计算工作。其记录的数据可以通过串行通讯，输入其它计算机进行处理。

• 2、已有地图数字化

数字化：是利用数字化仪对已有的地形图上的信息（如等高线）进行数字化的方法。也就是指把图形、文字等模拟信息转换成为计算机能够识别、处理、贮存的数字信息的过程。

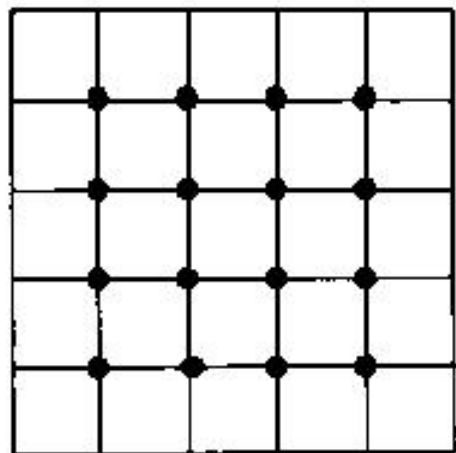
- 手扶跟踪数字化仪

特点：数据在计算机中比较容易处理，但速度慢，人工劳动强度大

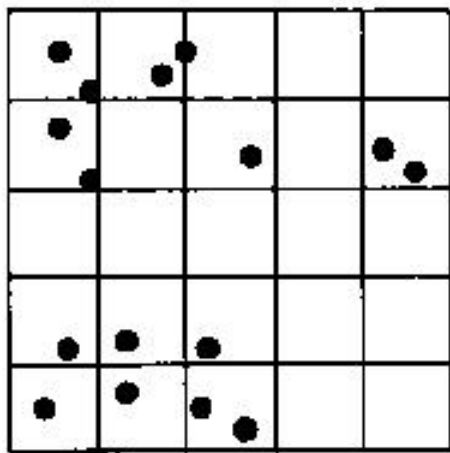
- 扫描数字化仪：对地图扫描后，再进行矢量化。

特点：效率高，但对软件要求高

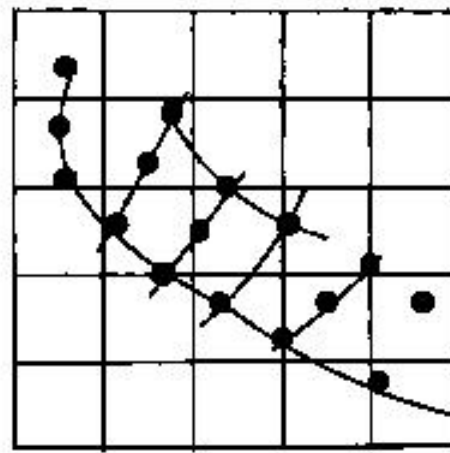
采样方式:



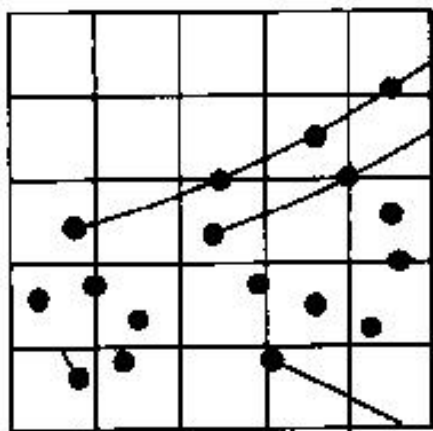
(1) 规则采样



(2) 随机采样



(3) 断面采样



沿等高线采样

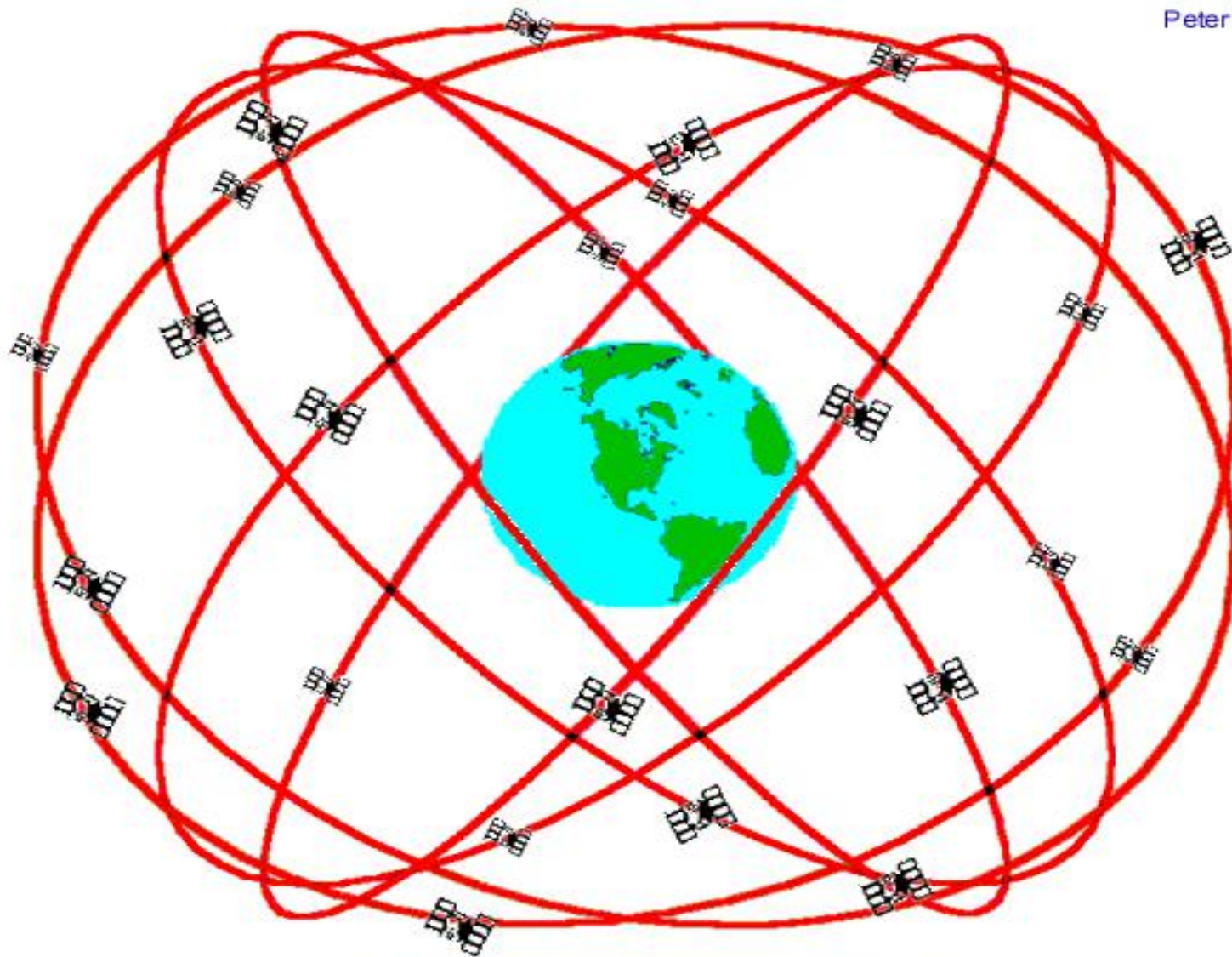
3、摄影测量方法

- 摄影测量法包括航空摄影测量法和地面立体摄影测量法。它是利用所摄的具有地表影像的像片，根据“光学模拟投影”原理，用立体测图仪、立体坐标仪或根据“数字投影”原理，用带自动记录接口的解析测图仪，在所模拟的地面立体模型上进行人工或半自动量测数据的模拟测图和解析测图技术。

模拟机助系统、 解析测图系统、 数字摄影测量系统

4、由遥感系统直接测得

GPS、雷达、激光测高仪（LIDAR）等



GPS Nominal Constellation
24 Satellites in 6 Orbital Planes
4 Satellites in each Plane
20,200 km Altitudes, 55 Degree Inclination

LIDAR(Light Detection and Ranging)



LIDAR

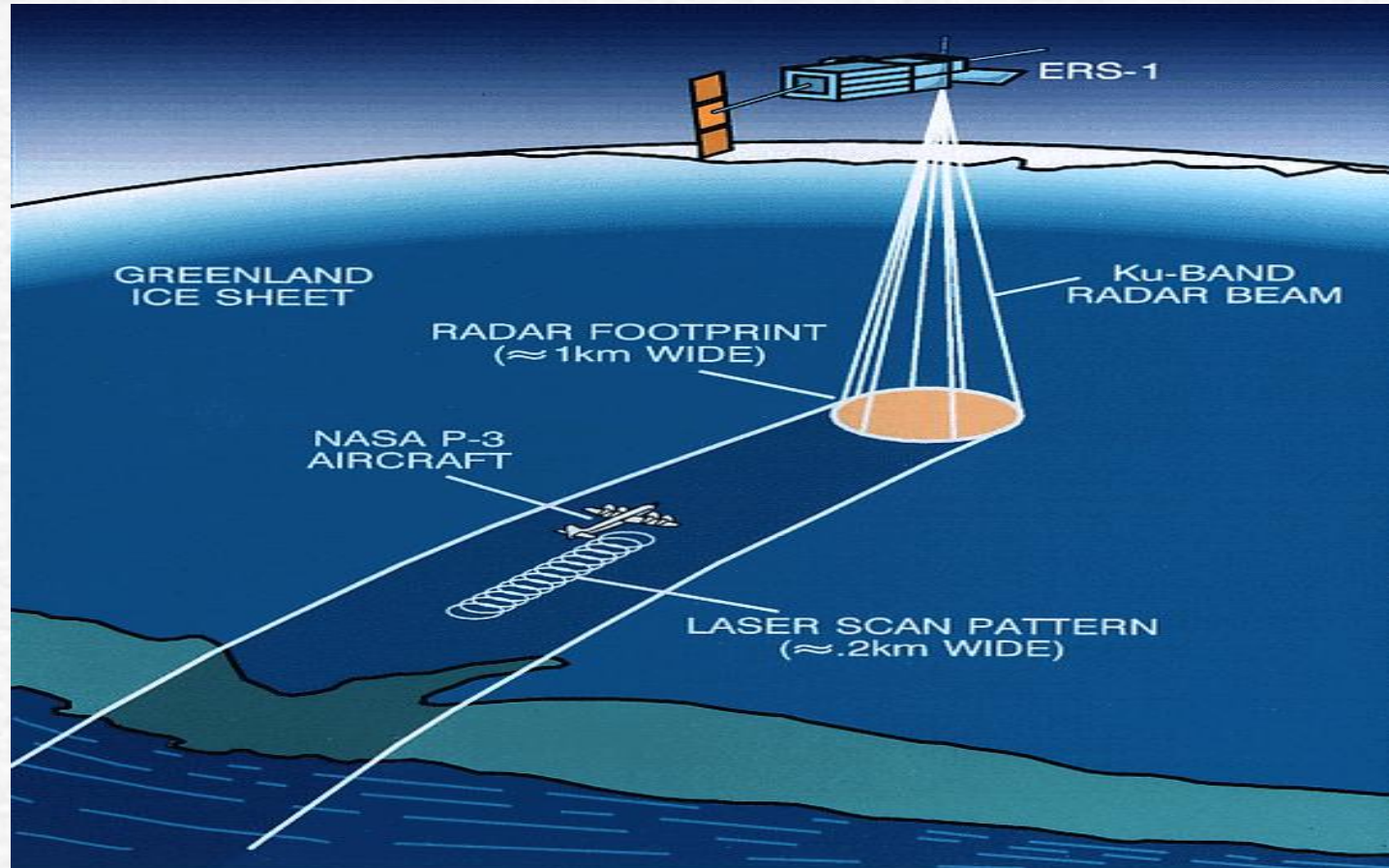


Figure 3. NASA P3 airborne missions provide high-resolution data that we used for the interpretation of satellite data.

四、DEM的建立

- 数据采集：获取建立DEM所需的基础数据（称为数据点）。
- 数据处理：以数据点为依据，用某种数学模型拟合地表面，进行内插加密计算，以获得符合要求的DEM。
- 数据记录：将数据及使用的程序以数字的形式记录于存储器中。

五、DEM的应用

- ❖ 作为国家地理信息的基础数据：我国现在强调4D产品的建设。即：DLG、DEM、DOM、DRG。前3D作为国家空间数据基础设施(NSDI)的框架数据。
- ❖ 各种线路设计与各种工程中，用于面积、体积的计算，各种断面图的绘制等；
- ❖ 在测绘中，用于绘制等高线，坡度、坡向图，立体透视图，制作正射影像及地图的修测等；

- ❖ 军事上，用于导航及导弹制导；
- ❖ 在遥感中，可作为分类的辅助数据；
- ❖ 是GIS的基础数据，可用于土地利用现状的分析、合理规划、及洪水险情预报；
- ❖ 工业上，可利用数字表面模型（DSM）绘制出表面结构复杂的物体的形状。

六、数字地面模型的发展过程

- ❖ 50年代末概念形成
- ❖ 60-70年代对DTM的内插问题进行研究
- ❖ 70年代中、后期对采样方法进行研究
- ❖ 80年代以来，全方位对DTM进行研究

我国DEM的建设情况

国家测绘局1994年建成了全国1:100万数字高程模型数据库；1998年完成全国1:25万数字高程模型数据库建设；1999年建设七大江河（松花江、辽河、海河、黄河、淮河、长江、珠江）重点防范区1:1万数字高程模型数据库；2002年建成全国1:5万数字高程模型数据库；各省正在建立本辖区1:1万数字高程模型数据库。

著名的DTM软件包

- 德国Stuttgart大学研制的SCOP程序
- Munich大学研制的 HIFI程序
- Hannover大学研制的TASH程序
- 奥地利Vienna工业大学研制SORA程序
- 瑞士Zurich工业大学研制的CIP程序。

7.2 数据预处理

DEM的数据预处理是DEM内插之前的准备工作。

1、数据格式的转换

数据采集的软、硬件不同，格式也可能不同。需要转换成软件要求的数据格式。

2、坐标变换

将数据变换成地面坐标系中，地面坐标系一般采用国家坐标系，也可采用局部坐标系。

3、数据编辑

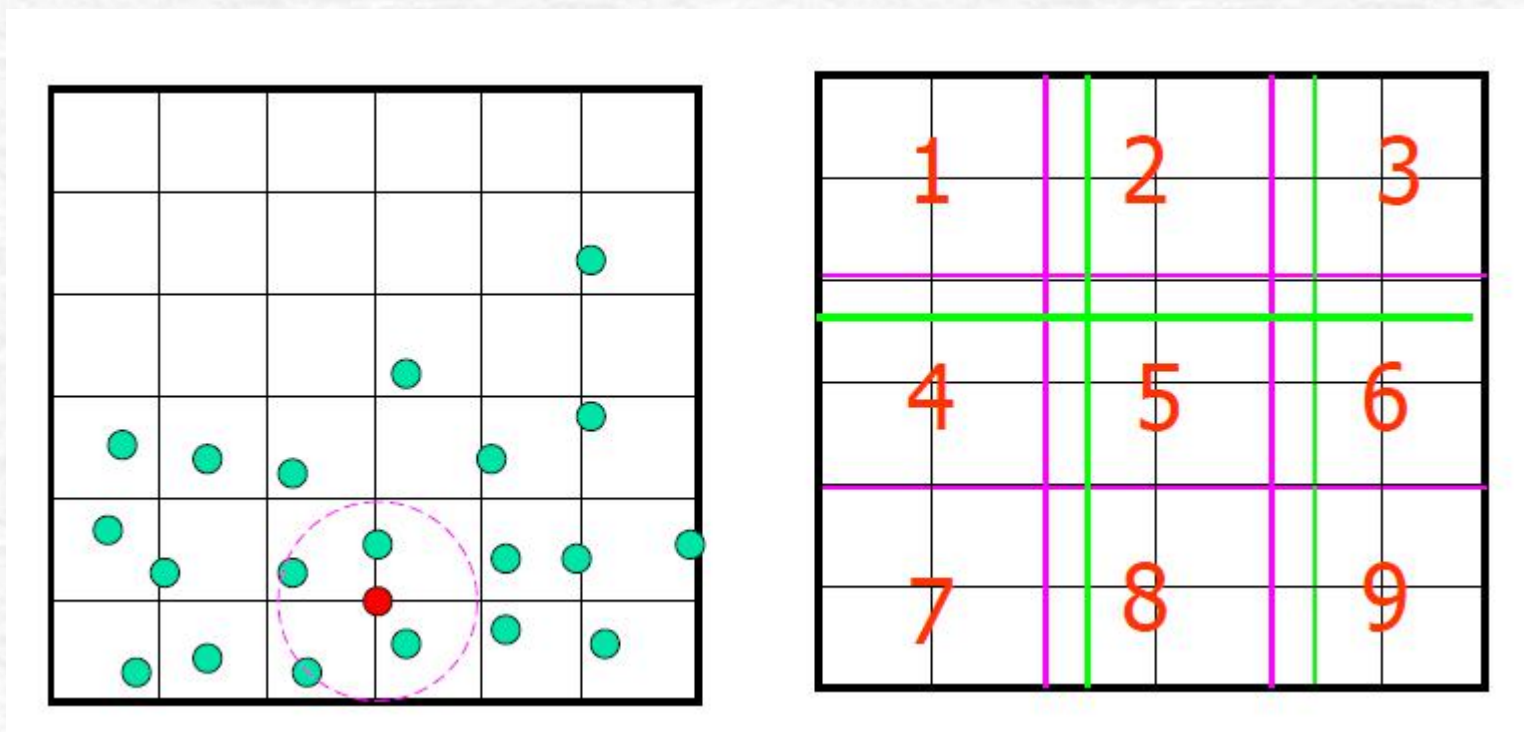
剔除错误、重复、过密的点

4. 栅格数据与矢量数据的转换

扫描的图是栅格形式，须经过二值化处理，再经过滤波或形态学处理，并进行边缘跟踪，获取等高线上按顺序排列的点坐标，即换成矢量形式。

5. 数据分块

数据采集方式不同，数据的排列顺序也不同。



一般情况下，为了保证分块单元的连续性，相邻单元间要有一定的重叠度。

数据分块方法:

- (1) 先将整个区域分成等间隔的格网
(通常比DEM格网大)
- (2) 将数据点按格网进行存储

交换法

链指针法

(1) 交换法

将数据按分块格网的顺序进行交换，使属于同一分块格网的数据点连续存放在一片连续的存储区域中，同时建立一个索引文件，记录每一块数据的第一点在数据文件中的记录号，由后一块数据第一点的序号减去该块数据第一点的序号，就能得到这个块中数据点的个数，从而迅速找出属于该块的所有数据点。

不需要增加存储量，但计算处理时间较多。

(2) 链指针法

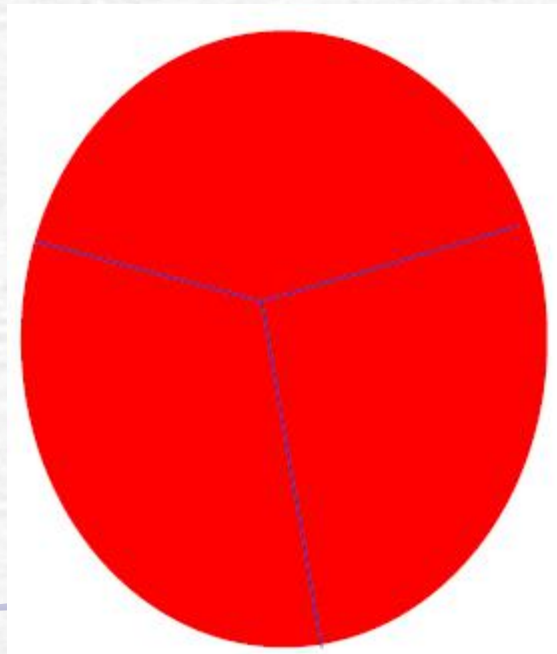
对于每一个数据点，增加一个存储单元（链指针），存放属于同一个分块格网中下一个点在数据文件中的序号，对该分块格网中的最后一个点存放一个结束标志。同时建立一个索引文件，记录每一块数据的第一个点在数据文件中的记录号。

检索时由索引文件得到该块的第一个数据点，再由第一个点的链指针检索出该块的下一个点，直到检索出该块中的所有数据点。

计算处理时间短，但要增加存储量。

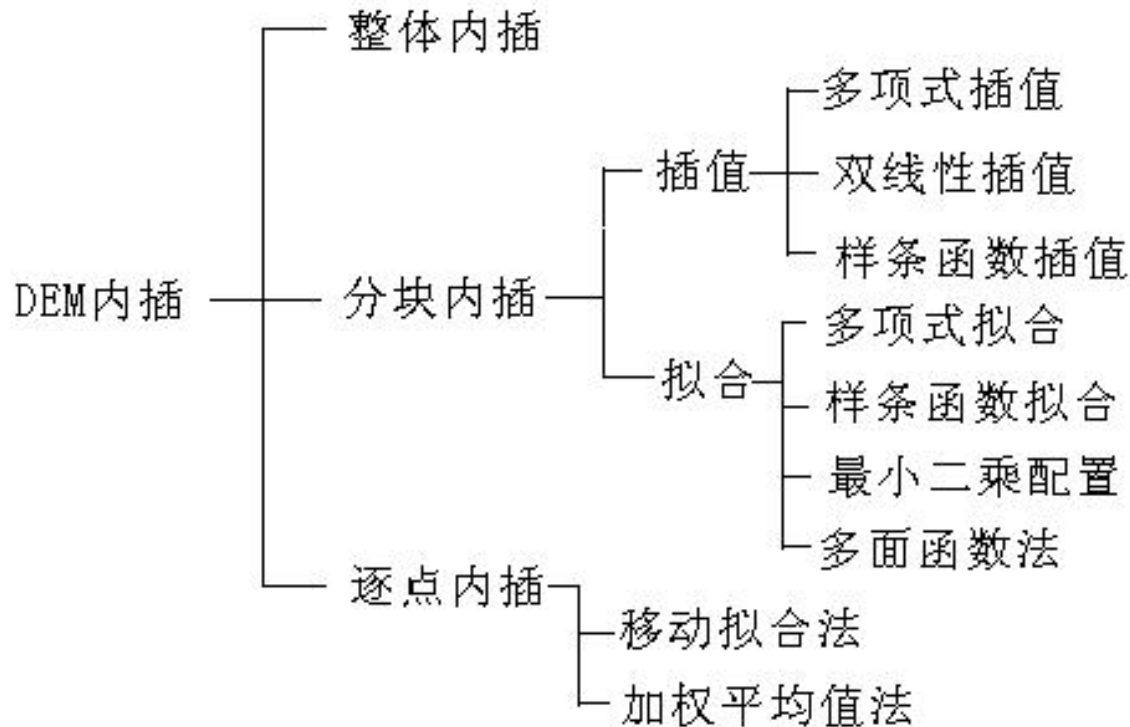
6. 子区边界提取

根据离散点内插规则格网DEM，通常将地面看作光滑的连续曲面，但地面并不光滑，因此需要将地面分成若干子区，使每个子区的表面成为一个连续光滑曲面。应该采用相应的算法提取这些子区的边界。



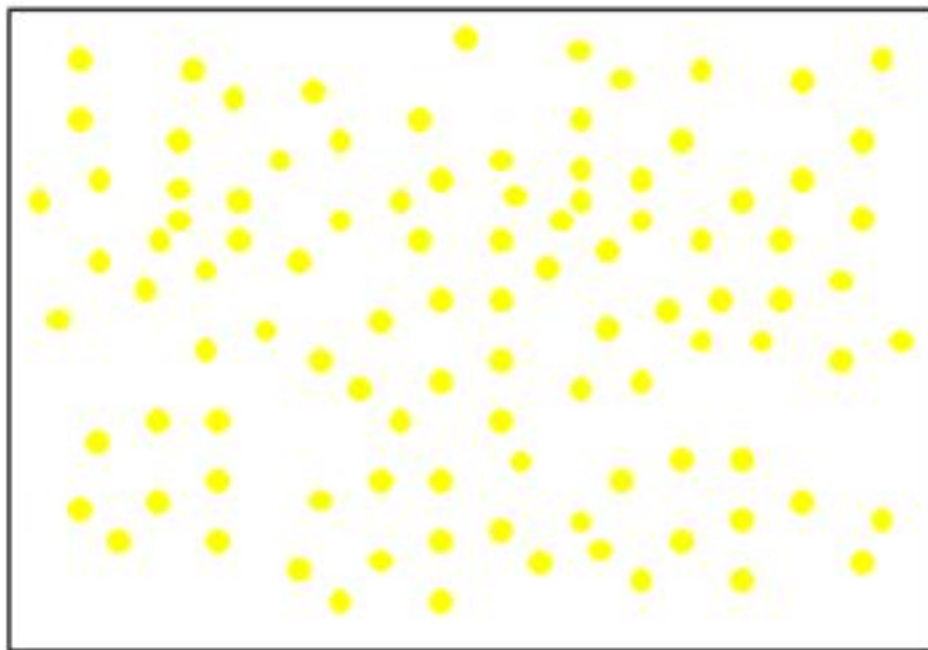
7.3 数字高程模型数据内插方法

DEM内插就是根据参考点上的高程
求出其它待定点上的高程，



整体内插

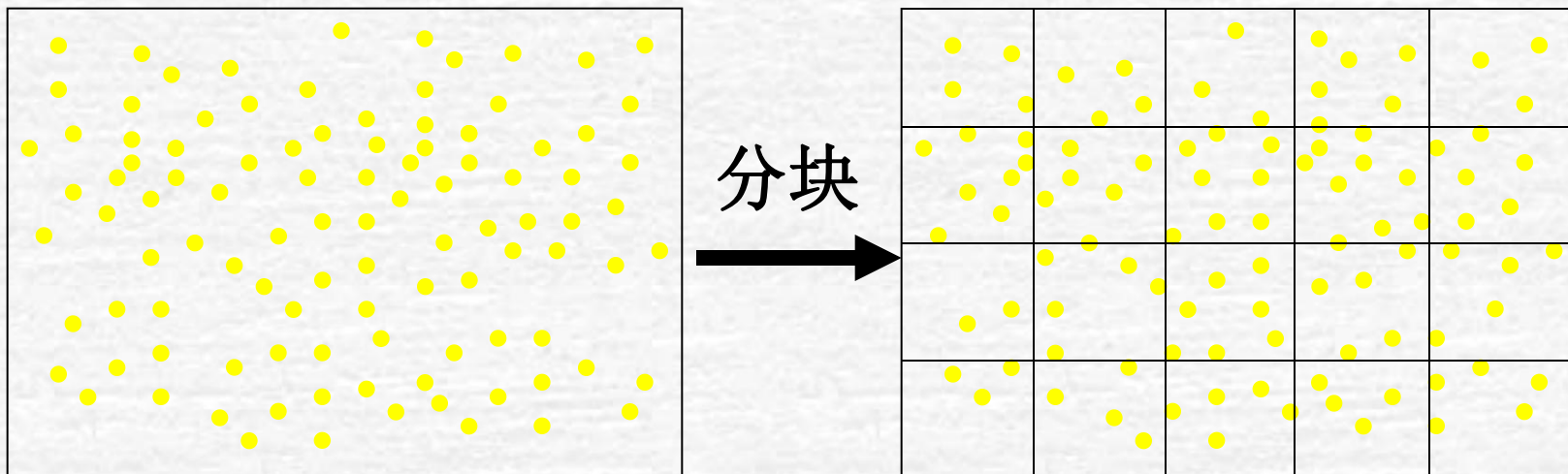
对整个区域使用一个数学模型，即一个多项式函数，利用区域内所有已知点的数据解求待定参数，以建立区域的拟合模型。



$$Z(x, y) = \sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^m C_{ij} x^i y^j$$

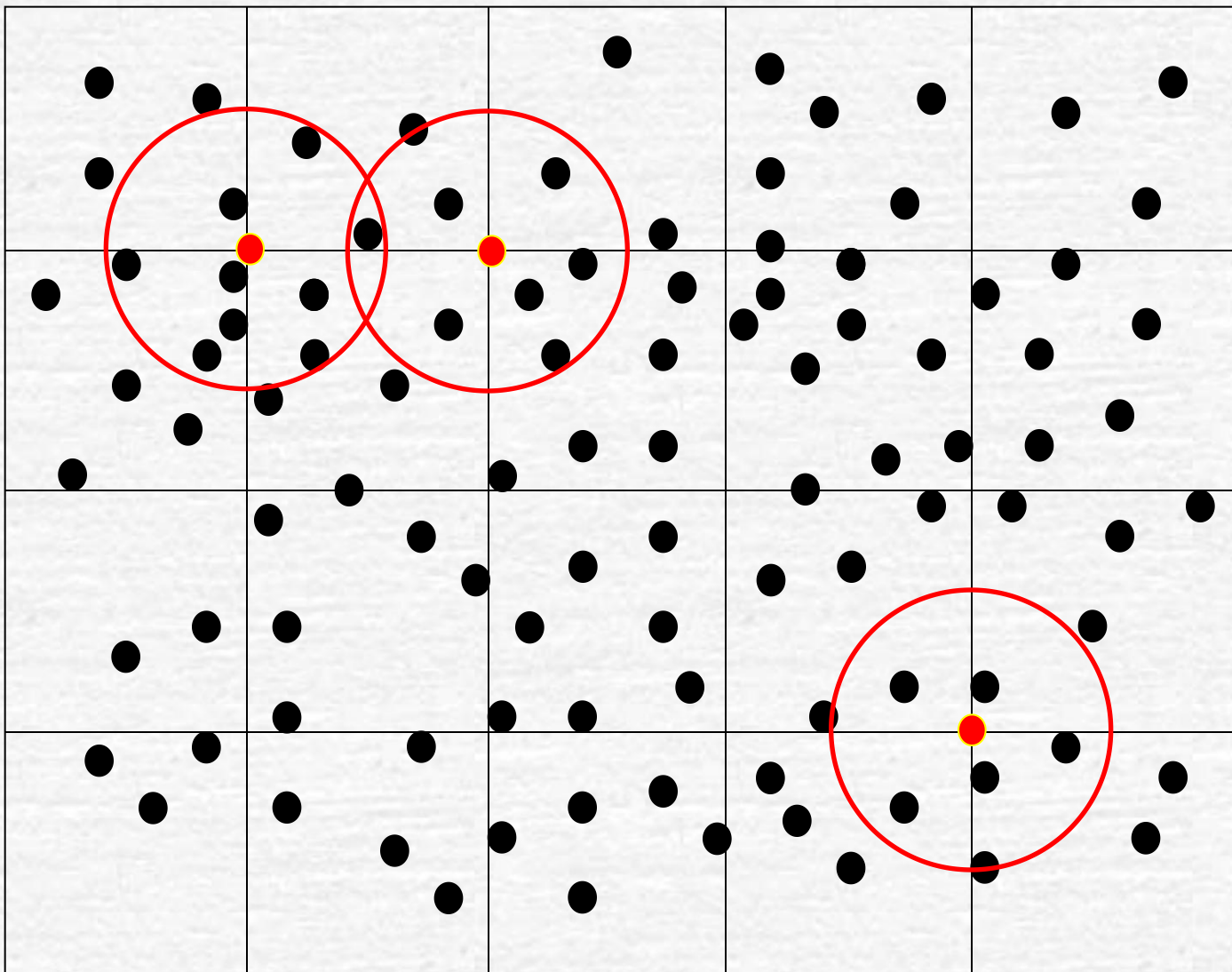
分块内插

分块内插是把整个区域分成若干子块，对每一子块使用一个函数拟合该区域内的地表面，利用该块内的数据点求解待定参数。



逐点内插法

以每一待定点为中心，定义一个局部函数去拟合周围的数据点。逐点内插法十分灵活，精度较高，计算方法简单又不需很大的计算机内存，但计算速度可能比较慢



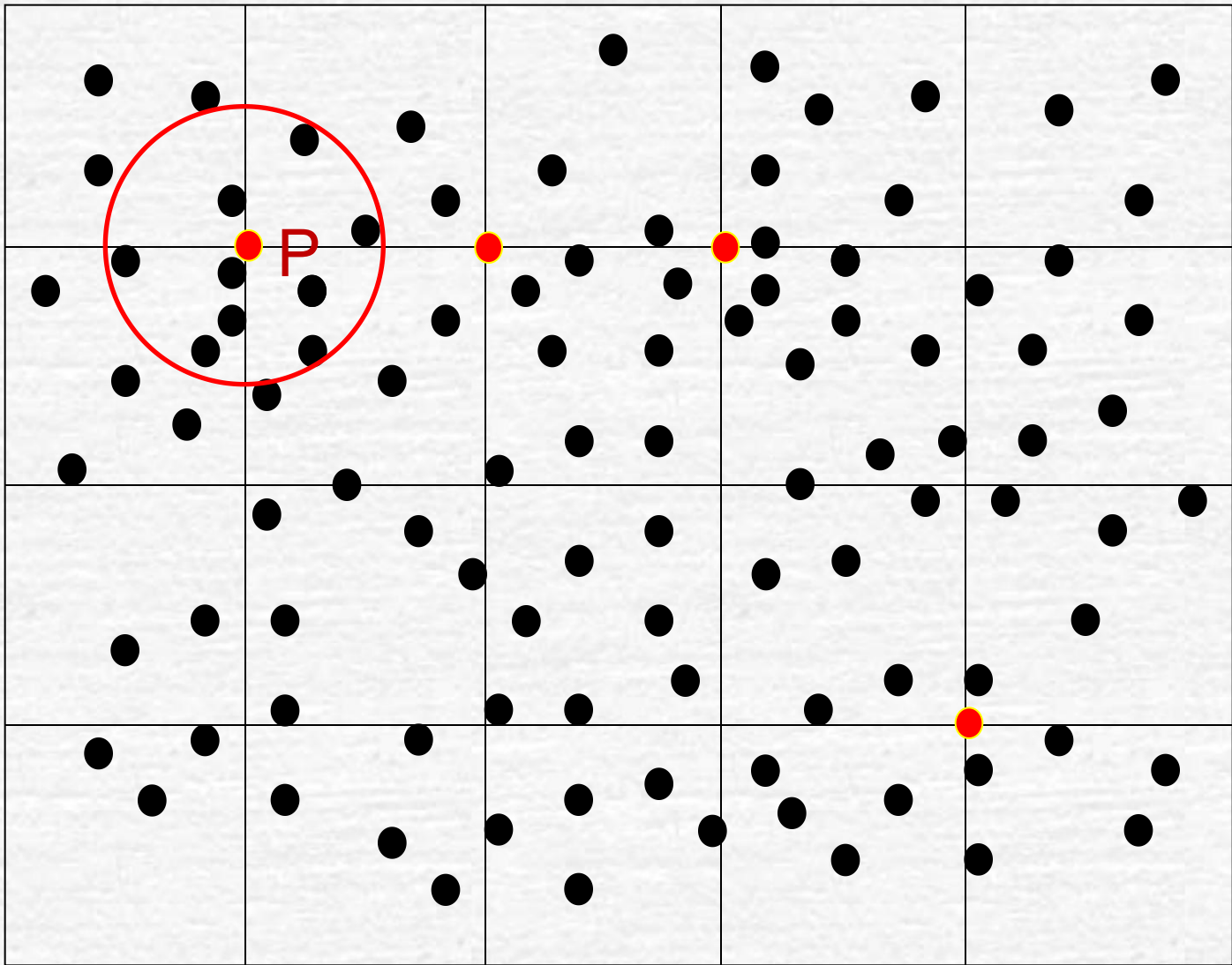
DEM内插主要思路： 选择一个合理的数学模型，利用已知点上的信息求出数学模型中的待定参数，再内插出待定点的高程。

关键： 使用的插值函数及待定点邻域的确定。

二、常用的内插方法

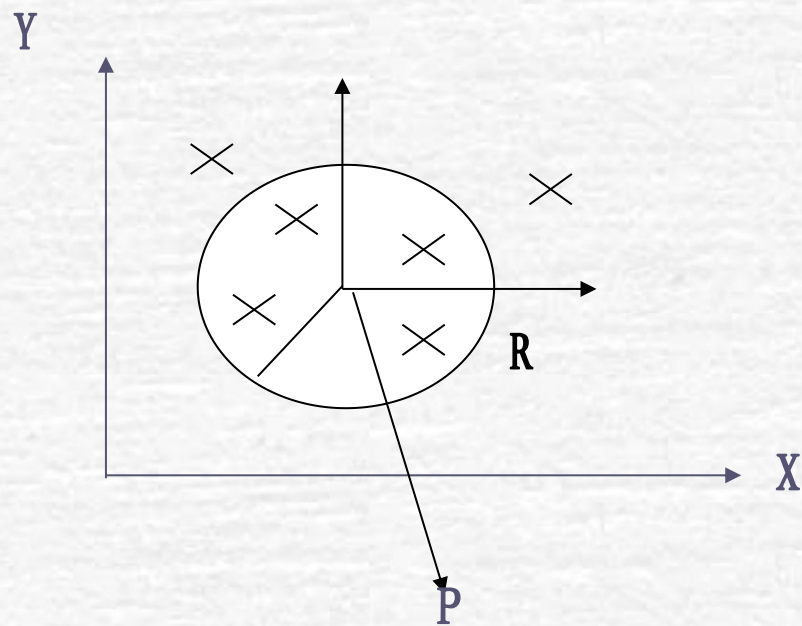
1. 移动曲面拟合法

以每一待定点为中心，定义一个局部函数去拟合周围的数据点。逐点内插法十分灵活，精度较高，计算方法简单又不需很大的计算机内存，但计算速度可能比其它方法慢



原理：以待定点为中心，定义一个局部函数去拟合其周围的数据点，进而求出待定点的高程。

常用在从离散的数据点中内插格网点的高程。



移动曲面拟合法步骤

(1) 建立局部坐标

计算以待定点P (X_p, Y_p) 为原点的坐标

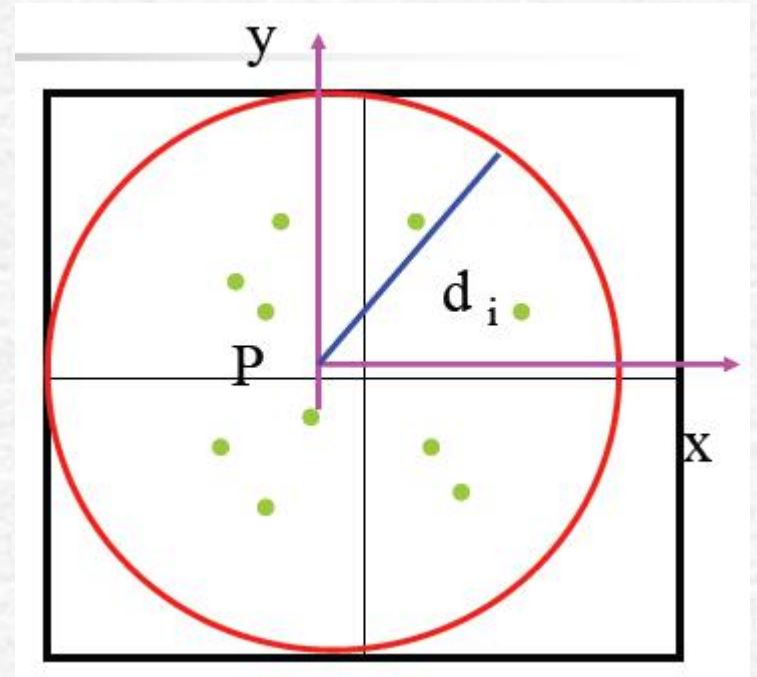
$$\bar{X}_i = X_i - X_P$$

$$\bar{Y}_i = Y_i - Y_P$$

(2) 选取邻近数据点：

以待定点P为圆心，R为半径选点

$$d_i = \sqrt{\bar{X}_i^2 + \bar{Y}_i^2} < R$$



(3) 选取二次曲面为内插函数

$$Z = A\bar{X}^2 + B\bar{X}\bar{Y} + C\bar{Y}^2 + D\bar{X} + E\bar{Y} + F$$

建立误差方程式

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

由 n 个数据点列出误差方程：

$$V = MX - Z \quad P$$

$$V = \begin{pmatrix} v_1 \\ v_2 \\ \vdots \\ v_n \end{pmatrix}$$

$$X = \begin{pmatrix} A \\ B \\ C \\ \vdots \\ F \end{pmatrix}$$

$$Z = \begin{pmatrix} z_1 \\ z_2 \\ \vdots \\ z_n \end{pmatrix}$$

$$M = \begin{pmatrix} \bar{X}_1^2 & \bar{X}_1 \bar{Y}_1 & \bar{Y}_1^2 & \bar{X}_1 & \bar{Y}_1 & 1 \\ \bar{X}_2^2 & \bar{X}_2 \bar{Y}_2 & \bar{Y}_2^2 & \bar{X}_2 & \bar{Y}_2 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & 1 \\ \bar{X}_n^2 & \bar{X}_n \bar{Y}_n & \bar{Y}_n^2 & \bar{X}_n & \bar{Y}_n & 1 \end{pmatrix}$$

(4) 计算每一数据点的权

权函数的含义：这里的权并不代表数据点的观测精度，而是反映了该点与待定点相关的程度。

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

R表示选点半径；D为待定点到数据点的距离

K为一个常数

(5) 法化求解

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

系数F是待定点内插高程值 Z_p

移动曲面拟合法关键问题解决

圆半径的确定

动态圆半径法的基本思路：从数据点的平均密度出发，确定圆内数据点（平均要有10个，），以解求圆的半径

$$\pi R^2 = 10 \times \left(\frac{A}{N} \right)$$

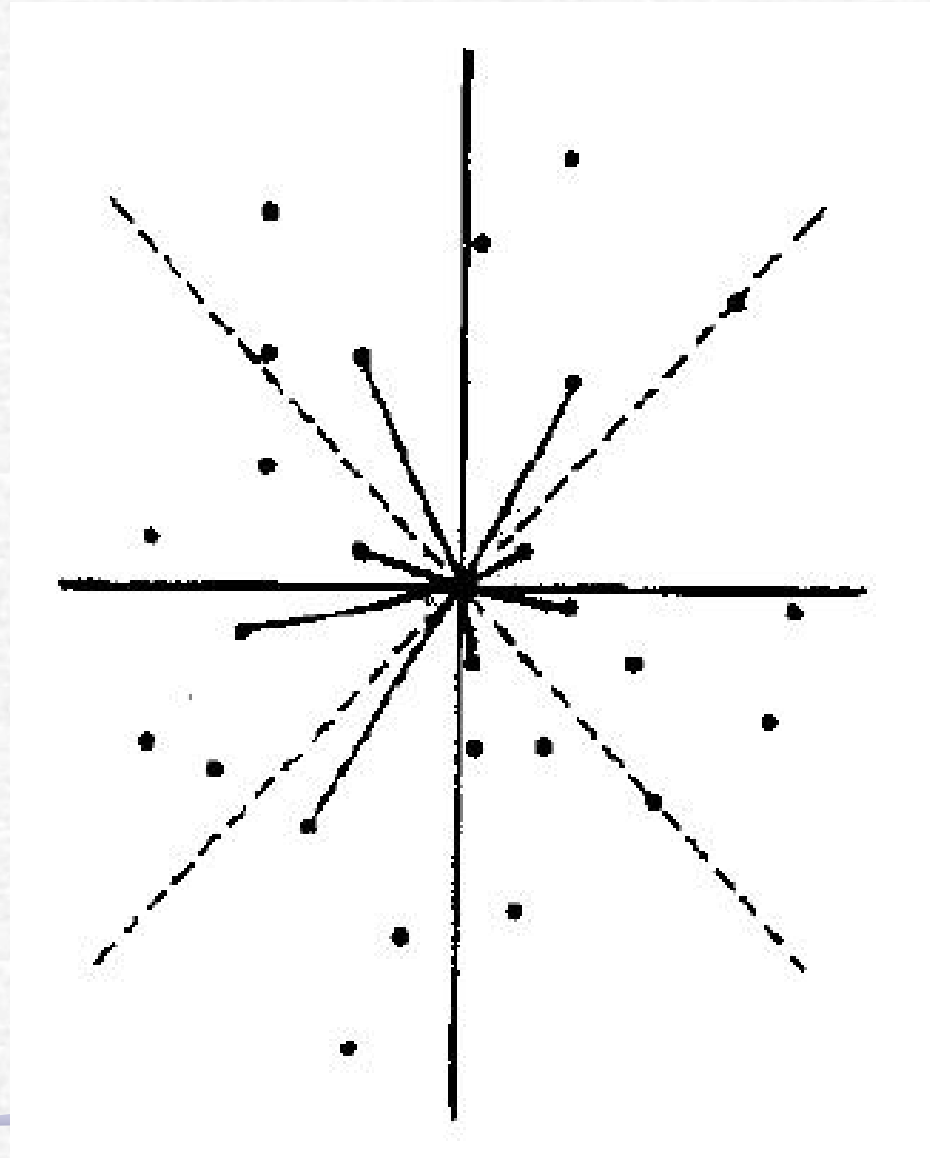
A----总面积

N---总点数

移动曲面拟合法注意事项

- 对点的选择除满足 $n > 6$ 外，应保证各个象限都有数据点，
- 当地形起伏较大时，半径 R 不能取得很大。
- 当数据点较稀或分布不均匀时，利用二次曲面移动拟合可能产生很大的误差，可采用按方位取点法

按方位取点法

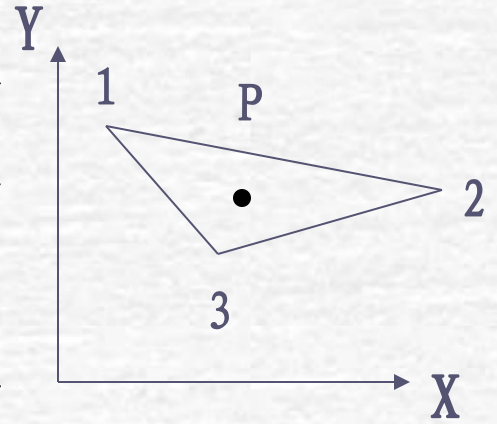


通过以上过程，总结DEM内插的步骤：

- 1) 选用合适的数学模型；
- 2) 利用已知数据点求模型中的参数；
- 3) 根据模型求待定点的高程。

2、线性内插

这个方法对数据的排列没有特殊的要求，它适用于数据点离散的情况，但要求这些离散点连成三角形格网，此时认为三角形格网的地表面为一平面，按直线内插待定点的高程。利用最靠近待定点的3个数据点来定义函数，待定点P的高程，则按线性内插函数确定。



$$Z = a_0 + a_1X + a_2Y$$
$$Z = \begin{pmatrix} 1 & X & Y \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \end{pmatrix}$$
$$\begin{pmatrix} Z_1 \\ Z_2 \\ Z_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & X_1 & Y_1 \\ 1 & X_2 & Y_2 \\ 1 & X_3 & Y_3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \end{pmatrix}$$

主要用于根据格网点与注记点、断裂线的高程内插待定点高程，常用于基于TIN的内插。

3、双线性多项式内插

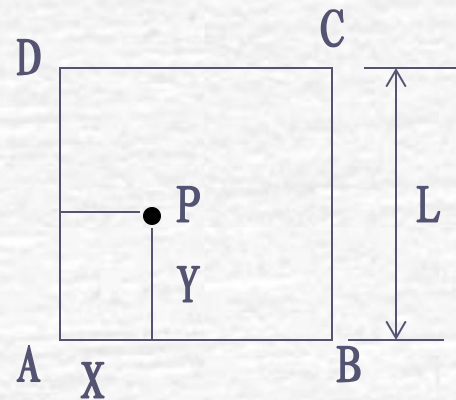
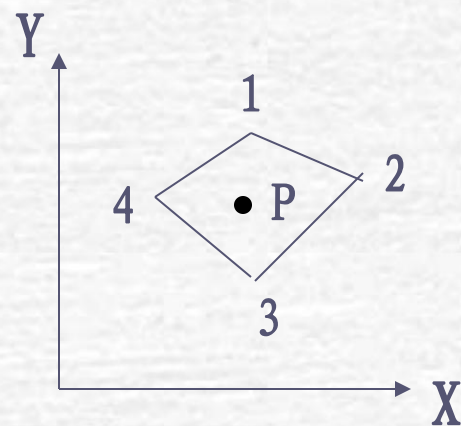
该法适用于数据点规则排列成矩形格网（或正方形格网）的情况。

$$Z = a_{00} + a_{10}X + a_{01}Y + a_{11}XY$$

$$Z = (1 \quad X) \begin{pmatrix} a_{00} & a_{01} \\ a_{10} & a_{11} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ Y \end{pmatrix}$$

以A为原点，P相对于A的坐标为X，Y

$$Z_P = \left(1 - \frac{X}{L}\right) \left(1 - \frac{Y}{L}\right) Z_A + \left(1 - \frac{Y}{L}\right) \cdot \frac{X}{L} Z_B + \frac{X}{L} \cdot \frac{Y}{L} Z_C + \left(1 - \frac{X}{L}\right) \cdot \frac{Y}{L} Z_D$$



主要用于根据格网点高程求等高线与格网点交点时补插中间交点的高程，基于格网的内插广泛采用此法。

4. 多面函数法内插

“任何一个圆滑的数学表面总是可以用一系列有规则的数学表面的总和，以任意的精度进行逼近。”即一个数学表面上某点 (X, Y) 处高程 Z 的表达式为：

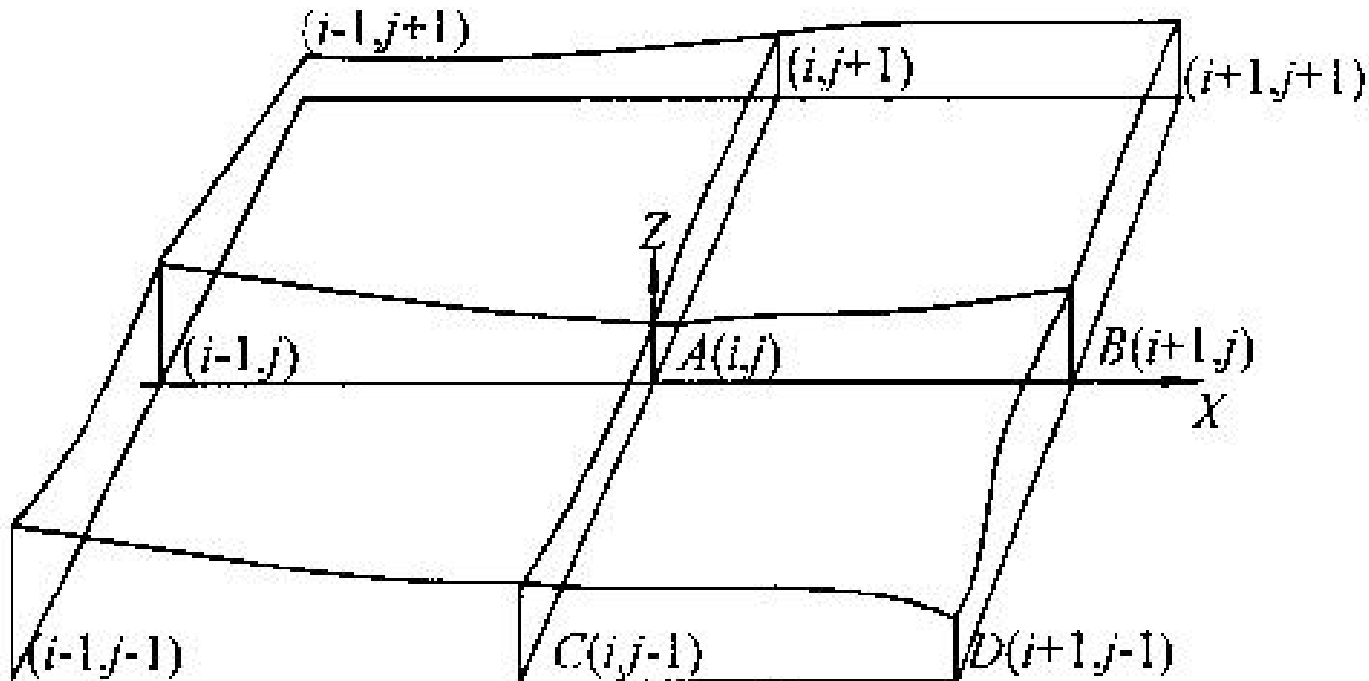
核函数

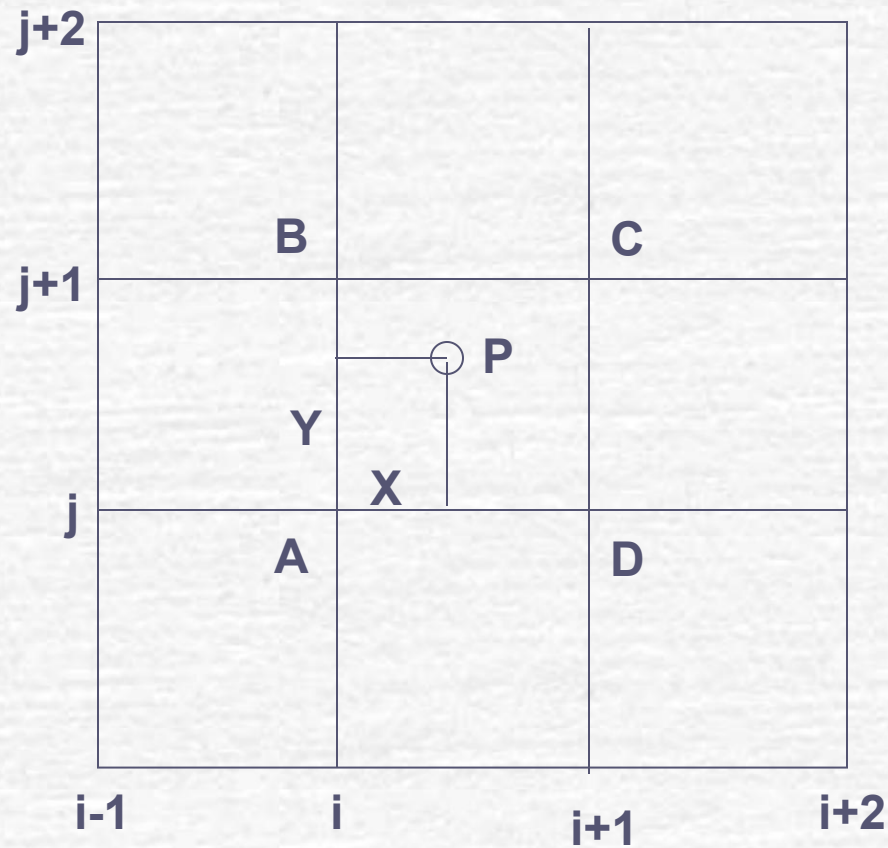
$$\begin{aligned} Z = f(X, Y) &= \sum_{j=1}^n a_j q(X, Y, X_j, Y_j) \\ &= a_1 q(X, Y, X_1, Y_1) + a_2 q(X, Y, X_2, Y_2) + \cdots + a_n q(X, Y, X_n, Y_n) \end{aligned}$$

具体做法：在每一个数据点上建立一个曲面，然后在 Z 方向上将所有曲面按一定比例叠加成一张整体连续曲面，使其严格通过各个数据点。

5、分块双三次多项式 (样条函数内插)

对每一分块定义出一个不同的多项式曲面，要求各分块曲面的交界处保持连续、光滑。





$$Z = \begin{bmatrix} 1 & X & X^2 & X^3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_{00} & a_{01} & a_{02} & a_{03} \\ a_{10} & a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{20} & a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{30} & a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ Y \\ Y^2 \\ Y^3 \end{bmatrix}$$

7.4 数字高程模型的数据存储

1. DEM数据文件的存储：

文件头+各格网点的高程

头文件存放有关的基础信息，包括起点（图廓左下角点）平面坐标、格网间隔、区域范围、图幅编号、原始资料的有关信息、数据采集仪器、采集的手段与方法、采集日期与更新日期、精度指标以及数据记录格式等。

文件头之后就是DEM数据的主体-各格网点的高程。对于小范围的DEM，每一记录为一点的高程或一行数据的高程；对于较大范围的DEM，数据量较大，则采取数据压缩的方法存储数据。

Arcview中文本格式的DEM数据存贮

文件格式		例
数据头	列数	15
	行数	25
	西南角格网单元纵坐标 x_0	12345.0
	西南角格网单元横坐标 y_0	56477.0
	格网间隔	10
	无效区域数据值	-9999
数据体	按行排列的数据体	12, 14, 25, 67, 34, 56, 78, ...

NSDTF-DEM是一种国家标准空间数据的交换格式，后缀一般是.dem

```
NSDTF-DEM
1.0
M
0.000000
0.000000
37532015.000000
2553820.000000
5.000000
5.000000
928
1285
1000
94400 94400 94400 94400 94400 94400 94400 94400
94400 94300 94300 94300 94300 94300 94300 94300
94300 94400 94400 94400 94400 94400 94400 94400
94500 94500 94500 94500 94600 94600 94600 94600
```

表五 (NSDTF-DEM文件头文件信息)

NSDTF-DEM	DataMark-----中国地球空间数据交换格式-格网数据交换格式 (CNSDTF-RAS或CNSDTF-DEM) 的标志。
1.0	Version-----该空间数据交换格式的版本号, 如1.0。
M	Unit-----坐标单位, K表示公里, M表示米, D表示以度为单位的经纬度, S表示以度分秒表示的经纬度
0.0	Alpha-----方向角。
0.0	Compress-----压缩方法。0表示不压缩, 1表示游程编码。
37532015.0	Xo-----左上角原点X坐标。
2553820.00	Yo-----左上角原点Y坐标。
5.000000	DX-----X方向的间距。
5.000000	DY-----Y方向的间距。
928	Row-----行数。
1285	Col-----列数。
100	HZoom-----高程放大倍率。

以上为头文件所对应的含义, 下面的数字则是具体的栅格单元数据值, 每个数值代表了一个栅格单元的高程值, 分行进行记录数据, 采取每10个栅格数据一行, 中间用空格分割, 用换行符分割下一行数据, 当dem的每行(列数)栅格数据记录完, 再用回车换行符分割。

2. 地形数据库：将整个范围划分成若干地区，每一地区建立一个子库，将这些地区合并成一个高一层次的大区域构成整个范围的数据库。

3、DEM数据的压缩

DEM数据压缩中常用的方法有**整型量存储**、**差分映射**及**压缩编码**等。

整型量存储 将高程数据减去一常数 Z_0

Z_0 可以是一个区域的平均高程，也可以是该区域的第一个高程

压缩编码

当根据各数出现的概率设计一定的编码，用位数 (bit) **最短的码** 表示出现 **概率最大** 的数，出现 **概率较小** 数用位数 **较长的码** 表示，则每一数据所占的平均位数比原来的固定位数 (16或8) 小

数据的平均最小位数可用信息论中熵的定义计算

$$\rightarrow H(d_1 d_2 \cdots d_n) = - \sum_{k=1}^n p_k \log_2 p_k$$

差分映射

相邻数据间的增量，数据范围较小，可以利用一个字节存储一个数据，使数据压缩至原有存储量的近四分之一

$$\Delta Z_0 = Z_0 \quad \Delta Z_i = Z_i - Z_{i-1} (i = 1, 2, \dots, n)$$

$$\begin{pmatrix} \Delta Z_0 \\ \Delta Z_1 \\ \Delta Z_2 \\ \vdots \\ \Delta Z_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ -1 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & -1 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & \dots & \dots & -1 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} Z_0 \\ Z_1 \\ Z_2 \\ \vdots \\ Z_n \end{pmatrix}$$

差分游程法 (增量游程法)

当差分的绝对值大于127时，将该数据之前的数据作为一个游程，而从该项数据开始一新的游程

-128 --- 127 →

⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
$2n+1$	$2n+2$...	$3n-1$	$3n$
$2n$	$2n-1$...	$n+2$	$n+1$
1	2	...	$n-1$	n

很高的压缩率，但其缺点是当游程较长时，数据的恢复需要较多的运算时间

小模块差分法（小模块增量法）

将DEM分成较大的格网——小模块，每一模块包含5*5或10*10个DEM格网

$$\gamma = 127 / \Delta Z_{\max}$$

17	18	19	20	21
16	5	6	7	22
15	4	1	8	23
14	3	2	9	24
13	12	11	10	25

21	22	23	24	25
20	19	18	17	16
11	12	13	14	15
10	9	8	7	6
1	2	3	4	5

优点是每一记录长度是固定的，每一记录与各个小模块联系是确定不变的。

7.5 数字高程模型应用算法

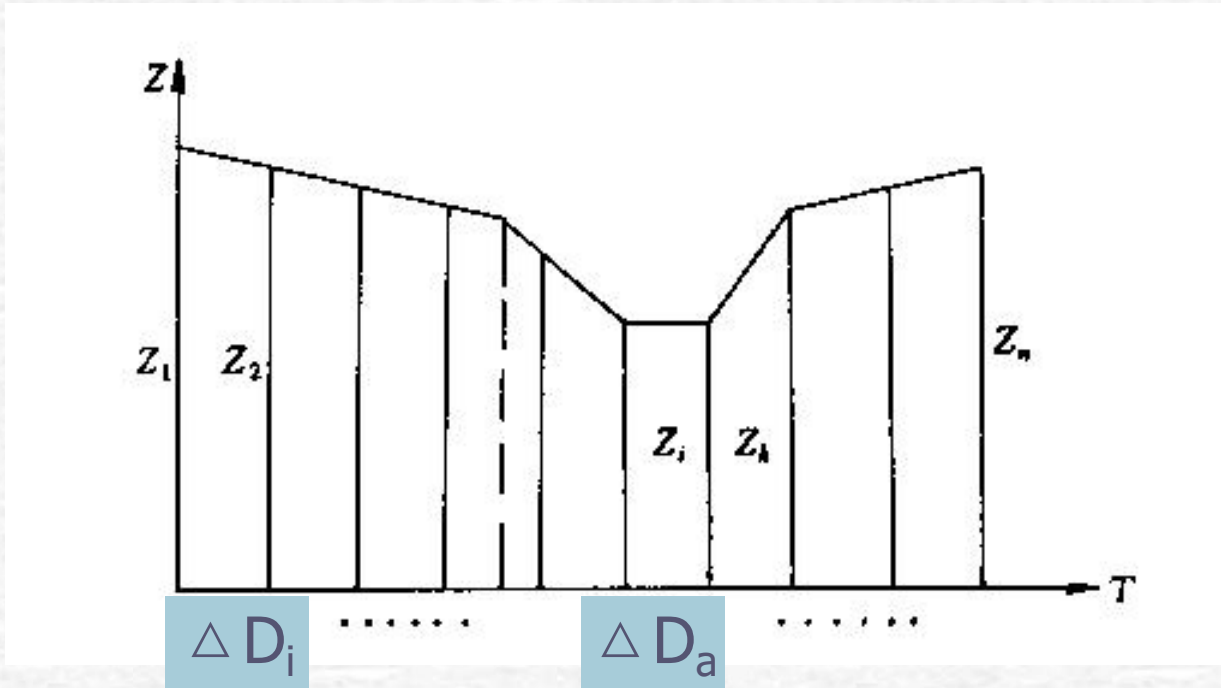
数字地面模型的应用

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、立体景观图、立体匹配片、立体地形模型及地图的修测。在各种工程中可用于体积、面积的计算，各种剖面图的绘制及线路的设计

一、基于矩形格网的 DEM多项式内插

DEM最基础的应用是求DEM范围内任意一点P (X, Y) 的高程

基于矩形格网的面积



剖面积

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \frac{Z_i + Z_{i+1}}{2} \cdot D_{i, i+1}$$

根据不同时期的两个数字高程模型计算地表变化的**体积** (**挖方或填方**)

将施工前后两个DEM化为建立在同一格网上的DEM，然后由相应格网点高程差代替高程，组成新的数字地面模型，然后再计算新数字高程模型的体积，即为变化的体积。

DEM体积由四棱柱与三棱柱体积进行累加得到

$$V_3 = \frac{Z_1 + Z_2 + Z_3}{3} \cdot S_3$$

$$V_4 = \frac{Z_1 + Z_2 + Z_3 + Z_4}{4} \cdot S_4$$

S_3 、 S_4 表示三棱柱与四棱柱的底面积

表面积

对于含有特征的格网，将其分解成三角形；对于无特征的格网，可由4个角点的高程取平均即中心点高程，然后将格网分成4个三角形。由每一三角形的三个角点坐标计算出通过该三个顶点的斜面内三角形的面积，最后累加就得到了实地的表面积。

根据DEM绘制等高线

根据规则格网DEM自动绘制等高线，主要包括以下两个步骤：

- ❖ **等高线跟踪**：利用DEM矩形格网点的高程内插出格网边上的等高线点，并按顺序排列；
- ❖ **等高线光滑**：利用顺序排列的等高线点的平面坐标 x, y 进行插补，并绘制成光滑的曲线。

1、等高线跟踪

按等高线的走向顺序插点并排序；

对同一高程的等高线先内插出所有等高线点，再逐一排列每条等高线的点。

2、等高线光滑（曲线内插）

在离散的等高线点间进行加密，使等高线成为光滑的曲线。

方法：根据已知的等高线点，用插值法或曲线拟合法建立某一符合实际要求的连续光滑等高线的函数，使已知点满足这个函数关系，并按该函数关系用计算加密点列来完成光滑连接的过程。

数字高程模型用于制作正射影像图

正射影像图：用正射像片编制的带有公里格网、图廓内外整饰和注记的平面图。

正射像片是指成像的物体具有正射投影性质的像片。

利用DEM制作正射影像，关键是将XY方形格网点的地面坐标换算成像片坐标。显然利用的公式为共线方程式。

$$x - x_0 = -f \frac{a_1(X - X_S) + b_1(Y - Y_S) + c_1(Z - Z_S)}{a_3(X - X_S) + b_3(Y - Y_S) + c_3(Z - Z_S)}$$
$$y - y_0 = -f \frac{a_2(X - X_S) + b_2(Y - Y_S) + c_2(Z - Z_S)}{a_3(X - X_S) + b_3(Y - Y_S) + c_3(Z - Z_S)}$$

DEM在线路设计中的应用

- 在铁路或公路工程中、内河航运河道治理、人工运河以及管道、高压输电线等线型工程建设中，线路设计是沿着初步拟定的路线测绘大比例尺带状地形图，在纸上定线并对各方案加以比较，然后再地面定测放线，测绘更大比例尺的地形图。路线设计主要设计平面、纵横断面、土石方、透视图等几个方面。在平面线形大体为之确定的情况下，**DEM**用于公路、铁路设计主要表现在不必进行进一步的野外测量，而由通过计算机辅助设计软件实习线路的平面曲线设计（布设曲线、求曲线平面坐标及里程桩号）、纵横断面设计（求设计高）、土方量计算和绘制线路透视图等。

DEM在抗击洪灾中的应用

