

# 利用SPOT影象提取高程信息的研究

舒 宁 林宗坚 陶 闻

**【摘要】**本文从理论上分析了以全数字化方法从SPOT影象提取高程信息关键环节上的问题和所采取的方法。根据影象成象特点,采用时序变化的外方位元素数学模型,其中精确选取控制点、合理选取初值和确定等效焦距、线元素和角元素分开解算迭代是十分重要的措施。采用新的数据组织方法可以避免高程内插中的精度损失。利用卫星影象特点,实现实由粗到精的多级影象匹配,同时引入改进的高精度最小二乘匹配,使整个匹配过程既保障了可靠性又满足精度要求。马赛地区SPOT象对窗的DEM生成结果表明,在影象质量得到保证,时差不大的前提下,可以达到10米高程精度。

**【关键词】**数据组织; 多级匹配; 高程提取

## 1 引 言

利用SPOT影象提取高程信息的全数字方法有几个主要环节: (1) 外方位元素的解算; (2) 影象匹配的数据基础——近似核线排队或规则格网上的新的数据组织; (3) 数字影象匹配的策略与方法; (4) 产生数字高程模型(DEM)的原理。下面就此从理论和实践两个方面进行讨论,有的需着重讨论,有的则提出几点需注意的问题。

## 2 SPOT影象外方位元素的解算

为解算外方位元素,必须根据SPOT影象的几何特点建立数学模型。由于SPOT影象是推扫式成象,每一扫描行为中心投影,扫描姿态和“摄站点”在整个象幅内呈时序变化,故在建立行中心投影共线方程时,必须建立外方位元素的时序(或行序)变化表达式。这里必须顾及地球曲率的影响,所有涉及地面坐标的地方都必须是切平面坐标系统的坐标。地面控制点坐标从地形图读出后,须转换为以影象中心(一般取左影象中心)对应地面点为原点的切平面系统坐标。

同时,控制点的选取,无论从影象上还是在地形图上,都必须考虑尽可能具有较高精度,一般从影象上可以估读出子象素,这对于有一定实际经验的人员来说是完全可以做到的。读地面坐标时则须选择地图比例尺,一般以1:1万地形图为宜。

收稿日期:1991-01-17

在解算之前, 还须注意  $y$  方向影象坐标的变换, 由于扫描倾角一般为20多度, 故先须将  $y$  坐标转换为“正直摄影”方式下的坐标:

$$y_i = f(y'_i \cos\phi + f \sin\phi) / (y'_i \sin\phi - f \cos\phi) \quad (1)$$

式中  $\phi$  为扫描倾角。  $y'_i$  为原始影象列方向坐标。

由于外方位元素中角元素与线元素相关性很强, 为避免法方程出现病态, 在解算过程中采取两类外方位元素分开交替迭代解算的方式。

从具体解算过程来看, 等效焦距的取值也须有所考虑。由于一般按卫星标称飞行高度计算出等效焦距, 故可以认为它并非是一个常量, 根据SPOT“头”文件中提供的飞行高度参数, 即可计算出相应的等效焦距。

外方位元素及其变化率参量的初值选取直接影响收敛速度, 一般角元素及其变化率初值为零, 线元素中  $Z_{00}$  的初值以“头”文件提供的卫星飞行高度为依据,  $X_{00}$ 、 $Y_{00}$  的初值则以影象四角上的控制点拟合一次多项式, 取其零次项。

采取了上述两项措施(计算等效焦距和选取初值)之后, 外方位元素的解算精度提高了许多。定向点上的点位拟合中误差由一个半象素<sup>[2]</sup>改善至近半个象素(每个象素为0.025mm)。检查点上的精度由两个象素提高到一个象素或0.9个象素。

表1是马赛景和宁乡景SPOT影象外方位元素解算精度表。其中包括检查点上的点位拟合精度。

表 1

影象	定向点精度	检查点精度
马赛左影象	$\sigma_p = 14.4\mu\text{m}$ (共14个点)	$\sigma_p = 27.7\mu\text{m}$ (共14个点)
马赛右影象	$\sigma_p = 15.2\mu\text{m}$ (共17个点)	$\sigma_p = 24.8\mu\text{m}$ (共19个点)
宁乡左影象	$\sigma_p = 14.0\mu\text{m}$ (共14个点)	$\sigma_p = 22.5\mu\text{m}$ (共31个点)
宁乡右影象	$\sigma_p = 21.2\mu\text{m}$ (共10个点)	$\sigma_p = 65.7\mu\text{m}$ (共11个点)

由于马赛景和宁乡左影象(1986年9月)的质量都很好, 选取控制点比较容易, 因而外方位元素解算精度好; 而宁乡右影象(1986年12月)的象质很差, 选点很困难, 所以在表中反映出检查点上的精度差, 定向点上的精度也不如前三者。这说明影象质量很重要, 只要影象质量比较好, 就可以在定向点上达到半个象素至0.6个象素的拟合精度。

需要提及的是有关坐标系统的定义问题。一般切平面坐标系统Y坐标正方向朝北, X正方向朝东, 而影象坐标系统原点在象幅左上角, x正方向朝南(并非正南方), y正方向朝东(并非正东), 为了保证大的方向基本一致, 可将切平面坐标系统X、Y坐标轴的定义交换, 影象坐标变换为原点在象幅中点, 且x正方向朝北, 这样就比较一致了。

总之, 在建立外方位元素时序变化数学模型的基础上, 注意精确选取控制点, 正确定义坐标系、按象幅计算等效焦距, 合理选取外方位元素初值, 将线元素和角元素分开交替迭代解算, 是可以获得具有较高精度的外方位元素的。

### 3 影象匹配的数据基础

在解出左、右影象的外方位元素及其变化率之后，只要通过数字自动匹配，确定出同名点，即可由同名点的左右影象坐标计算出该点的地面高程，进而形成DEM。这里的问题在于数字相关一般需要在对左右影象数据重新组织即作核线排队后进行，但是在考虑到DEM生成过程中的精度损失，考虑到一般成果要求为规则格网上的DEM，可以采取规则格网上的数据组织方法。

采取左影象先作多项式校正，形成规则格网上的影象，然后将右影象与之配准，即进行影象到影象的几何配准处理，同样采取多项式拟合方法。这时上下视差、左右视差均控制在一定的范围内。在此基础上，在校正后的左影象上所确定的一个格网（目标点格网）就基本上相当于地面上的一个规则格网了。针对该格网上的每一点在已作配准处理的右影象上搜索同名点，再作前方交会，实际上就是计算地面规则格网上的高程，它减少了一次由非规则格网到规则格网的内插过程。虽然在前交之前左右同名点坐标必须同时恢复为原始影象坐标，但那只是作多项式逆变换。由于一般不是以整幅影象为单位进行影象匹配和前方交会，而是取影象窗来提取高程，比如 $1024 \times 1024$ 列的影象窗，它接近三分之一幅 $1:5$ 万图的范围。这时作多项式校正，一般在控制点上的拟合精度均可以保证在一个象素之内（见表2），在检查点上的精度则在一个象素左右，平面位置误差约 $10m$ 。所以按此方案在前方交会时，可以认为是一次形成规则格网上的DEM，减少了高程内插环节中的精度损失。

### 4 多级影象匹配

由于SPOT影象匹配所具有的复杂性，有必要将匹配分为由粗到精的多级匹配过程。从SPOT卫星影象几何特点出发，可采用三级匹配过程：①一级匹配。影象间的配准套合处理，用以控制后续匹配搜索范围；②二级匹配。采用象素级精度匹配算法，建立影象视差格网；③三级匹配。采用子象素级的高精度匹配算法，生成高精度视差格网，以利于提取高程信息。

#### 4.1 一级匹配

影象匹配中，一般先对影象进行几何预处理，使影象视差变化控制在一定范围内。根据所控范围，可分为一维的视差控制处理（如核线处理）和二维的视差控制处理，如配准处理，前者是将视差变化控制在一维范围内，后者则控制视差于尽可能小的二维搜索范围内。

根据卫星影象特点多级匹配中首先用多项式进行象对间的配准处理，即在左右影象上分别选取一定数量的同名控制点，用多项式进行拟合，然后右影象对左影象重采样配准。上述处理控制了视差二维变化范围，具有匹配初值预估的作用，故称之为一级匹配。

一级匹配实验结果见图1、表2所示。图1表示的是经三级匹配后确定的 $x$ 、 $y$ 视差值分布，这一分布即说明了一级匹配的影象配准情况。这里两幅象对窗配准，均采用双线性重采样方式；配准控制点选取，首先由人工定初值，然后由PDFM匹配法（后面介绍）确定到子象素。表2中的检查点由三级匹配的结果提供，以视差值的均方根值作为检查点精度估值。

由实验得出，一级匹配具有如下特点：

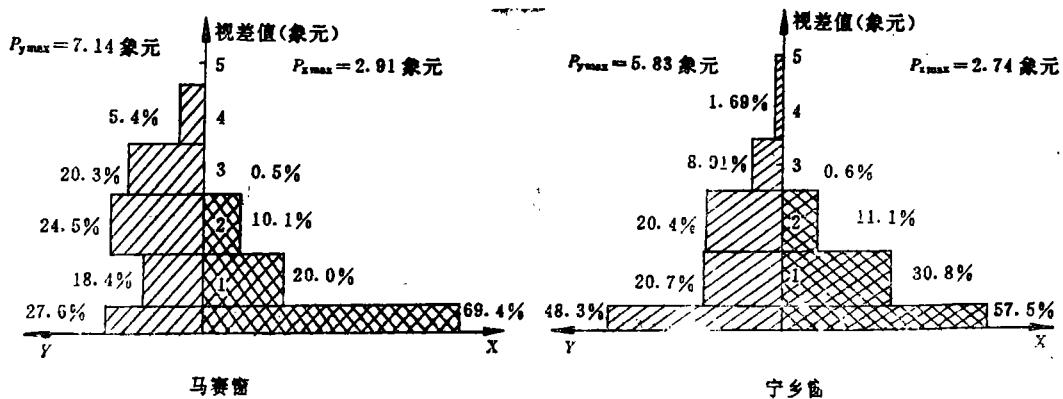


图 1 影象对配准后X、Y视差值分布

表 2

影象窗 名称	尺寸 (象元)	影象对间配准精度				对地图纠正精度 控制点 点数 $\sigma_x$ (m) $\sigma_y$ (m)	
		控制点		检查点			
		点数 $\sigma_x$ (象元)	$\sigma_x$ (象元)	点数 $\sigma_y$ (象元)	$\sigma_y$ (象元)		
马赛窗	1424 × 1024	9	0.35	0.93	983	0.68 2.04	(未做)
宁乡窗	1310 × 1100	8	0.32	0.37	855	0.57 1.29	6 1.24 2.94

注:表 2 中马赛窗高差500米,宁乡窗高差200米左右

①处理方法简单,仅需少量同名控制点。在一定的影象尺寸范围内,选用1~3次多项式即可。表二均采用二次多项式配准。对于地形起伏较大地区的影象,可采用分块配准处理;

②x、y方向视差变化均有控制,同名点在左右影象上的行列号相差不大,容易预测各点配准初值(见图1、表2);

③利于生成DEM数据(本文第二部分已对此作了分析)。

## 4.2 二级匹配

这是整个匹配过程的关键,其目的是生成象素级精度的视差格网。由于一级匹配实施了二维视差控制处理,x、y视差变化范围均有控制,故二级匹配相应地采用了二维匹配方法,搜索沿左片(纠正片)规则格网进行。为减少二维匹配运算量,匹配中充分利用一级匹配结果,对二维搜索范围作如下限制:

①待匹配点视差初值(x和y)  $P_0(i, j)$  由前面相关结果确定:

$$P(i, j) = [P(i-1, j) + P(i, j-1) + P(i+1, j-1) \times 0.5] / 2.5 \quad (2)$$

i为行号, j为行号。

②行方向只搜索初值左右各三个象元。

③认定任一点上下视差(即行号相差)在±2象元内,匹配搜索不超过此界限。列方向只搜索初值上下各一象元。

由一级匹配结果可知,大部分匹配点均位于上述搜索范围内,个别超出点可由第三级匹配补救。

匹配以规格化相关系数为主的多重判据进行,目标区为 $7 \times 11$ 窗口。第一条视差断面匹配,可采用多频道匹配法。由于一级匹配同名点拟合较好,第一条视差断面初值均赋零值,直接进行搜索匹配,匹配结果与多频道法相当。

最后对生成的视差格网进行可靠性后处理。首先由周围成功点内插匹配失败点视差,然后采用五点三次拟合多项式沿纵横断面进行视差滑动拟合,当拟合值大于3倍视差值中误差时,该点视差值由拟合值取代。

最后,值得提及的是,SPOT影像经常分布有匹配算法无法实施的区域,如云、雪覆盖区,大片水域、阴影区等面积较大区,这些区域我们称之为匹配死区。匹配中必须渡越死区,否则可能导致匹配粗差或发生相关中断。故在二级匹配中,我们设计了有关死区提取及死区渡越程序。

### 4.3 三级匹配

在二级匹配基础上建立高精度视差格网,以利于提取高程信息。最小二乘匹配(LSM)算法是目前较为有效的高精度匹配算法。然而LSM涉及参数较多(6个几何变换参数,2→辐射变换参数),匹配非常耗时,约每点需3~5秒钟。实际中这种速度是不能作为高精度视差格网生成算法的,为此,保留主要参数,采用了简化的LSM算法,即SLSM:

$$\begin{aligned}v_1 &= h_0 + h_1 G_s(x, y) - G_m(x, y) \\v_2 &= G_s(x + dx, y + dy) - G_m(x, y)\end{aligned}\quad (3)$$

这里,  $G_s$ 、 $G_m$ 分别为搜索窗口和目标窗口灰度矩阵,  $h_0$ ,  $h_1$ 为辐射变换参数,  $dx$ ,  $dy$ 为视差移位量。

对119个点分别用LSM及SLSM进行匹配,对比试验得出:①精度指标(见图2)。在窗口尺寸变化情况下,SLSM精度较平稳;而LSM与窗口大小有很大关系,窗口越小,精度显著降低,只有窗口大于 $17 \times 17$ 时,才表现出较好的精度水平;②可靠性与收敛率指标。这两项指标好坏主要取决于初值好坏,而对初值好坏的敏感性又与算法的拉入范围有关,经测试,LSM拉入范围为2象元,而SLSM可达3~5象元;③速度指标。由于SLSM平差参数较少,

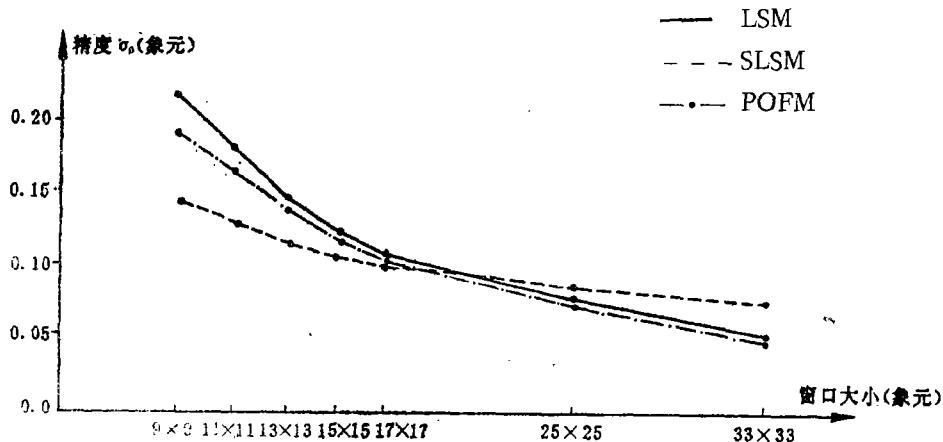


图2 匹配精度随窗口大小变化情况

且采用了两套参数分别解求的交替迭代方式，窗口重采样利用了双线性查表算法，因此SLSM运算速度较快，平均CPU耗时与LSM相比为1:16.5。

由此试验得出，LSM虽具有附加参数之完整性（8个参数），但其算法质量指标并非优越，尤其在小窗口条件下，精度显著降低。从附加参数理论分析，在小窗口情况下，参数间相关性问题和过渡化问题趋于明显，模型误差影响增大，这不仅导致方程状态恶化，同时会使解不稳定或引起精度降低。试验也证实，当参数间相关性大的点，其精度较低。

为改进上述附加参数中的问题，需进行参数筛选。在经典LSM的6个几何参数中，2个平移参数代表了视差主要分量，可视为主参数，其余4个参数则视为辅助参数。为提高主参数精度，减少模型误差影响，可在LSM平差迭代中，对辅助参数进行一维显著性t检验，剔除非显著参数。这就是LSM—2算法。这里， $t_i = a_i / \hat{\sigma}_0 \sqrt{\theta_{ii}}$ ， $a_i$ 为参数解， $\hat{\sigma}_0$ 为单位权方差估值 $\sqrt{\frac{\sum (\Delta g)^2}{n-r}}$ （ $\Delta g = G_s - G_m$ ）。以显著水平 $\alpha = 10\%$ ， $t_{\alpha/2} = 1.65$ 作为参数取舍阈值， $t_i < t_{\alpha/2}$ 的 $a_i$ 参数在下次迭代中舍去。经试验测试，POFM在精度上有进一步提高（见图2），速度比LSM快约1倍，且收敛很快，一般只迭代2~3次。

由上可知，SLSM算法具有速度快，拉入范围大，精度平稳等特点，同时精度也可达0.1象元左右。因此SLSM可以作为建立高精度视差格网的三级匹配算子。POFM算法速度和精度比LSM均有一定改善，因此可作为高精度控制点匹配算子。在一级匹配中，即以此算法匹配同名控制点。

#### 4.4 多级匹配精度分析

①多级匹配内精度情况。一级匹配结果如前面表2所示。 $x$ 、 $y$ 方向视差值均得到了较好控制。在此基础上，进行二级、三级匹配，最后得到视差格网文件。我们对格网上每对匹配点进行了相关系数值统计，统计结果为相关系数大于0.6的点数占总点数的99%。同时还计算了各匹配点SLSM匹配精度均值，即有：

$$\bar{\sigma}_p = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sigma_{p_i} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\sigma_{p_{xi}}^2 + \sigma_{p_{yi}}^2)^{1/2}$$

这里 $\sigma_{p_{xi}}$ 、 $\sigma_{p_{yi}}$ 为SLSM匹配算法平差计算的 $dx$ 、 $dy$ 中误差（由（3）式可解得）。匹配窗口为 $15 \times 15$ 。计算结果 $\bar{\sigma}_p = 0.102$ 象元。

表 3

量测点数	423个
量测中误差	$\sigma_{xy} = 0.41 \text{ pixd}$
最大差值	$\sigma_{xy}(\max) = 1.75 \text{ pixd}$

②多级匹配外精度情况。图3、图4分别为匹配的左右马赛影象窗，其中十字丝标记为同名影象点，图4中的少许小黑点标记为失配点的内插点。将图3、图4负片在18-18立体坐标量测仪进行了人工立体量测，量测结果与全自动多级匹配结果（仅为二级匹配结果）作比较，两者差值统计见表3。

由此可以看出多级法匹配内外精度水平均较好，且可靠性较高。精度达到子象素级。



图3 SPOT左片



图4 SPOT右片

## 5 前方交会及实验结果分析

在进行前方交会计算时需要注意的是，根据左右影象外方位元素和同名点左右影象坐标计算高程，一方面要按同名点的行方向坐标由中心行外方位元素和变化率参数计算出该点所在行的外方位元素；另一方面所计算出的高程还只是切平面坐标系统内的高程，还必须将它换算为高斯坐标系统内的坐标。这两个方面均是不同于航摄数字化影象前方交会的地方。

按照新的数据组织方法，利用SPOT影象计算高程时，必须具备以下前提：①同名点坐标必须是原始影象坐标；②已解算出左右影象中心行的外方位元素及其变化率；③同名点集合已经相应于地面上的一个规则格网。

根据本文所述方法，对法国马赛地区SPOT象对窗（ $1024 \times 1024$ ）进行了高程提取的实验。这里对23个检查点进行了前交精度检验。统计结果如表4。由表知，三个方向的中误差均在10m以内。这里检查点是由人眼在图象终端上识别的同名点，精度一般在1个象素之内。因此，只要保证影象匹配的精度在子象素级，高程提取是可以达到10m精度的。

图5是按马赛窗同名点格网前方交会形成的DEM影象图。为便于显示首先将直接前交生成的DEM格网（80m间距）双线性内插为20m间距格网，内插后根据这一地区高差，将高差转换为灰度影象，即以128个灰度级代表试验区高差，再将此DEM影象作彩色密度分割，最后由闭路照相输出。由于每一灰度代表了一个高程值，故密度分割后可以显示出等高线来。

表 4

方向	中误差
$x$	9.1m
$y$	8.5m
$z$	9.9m

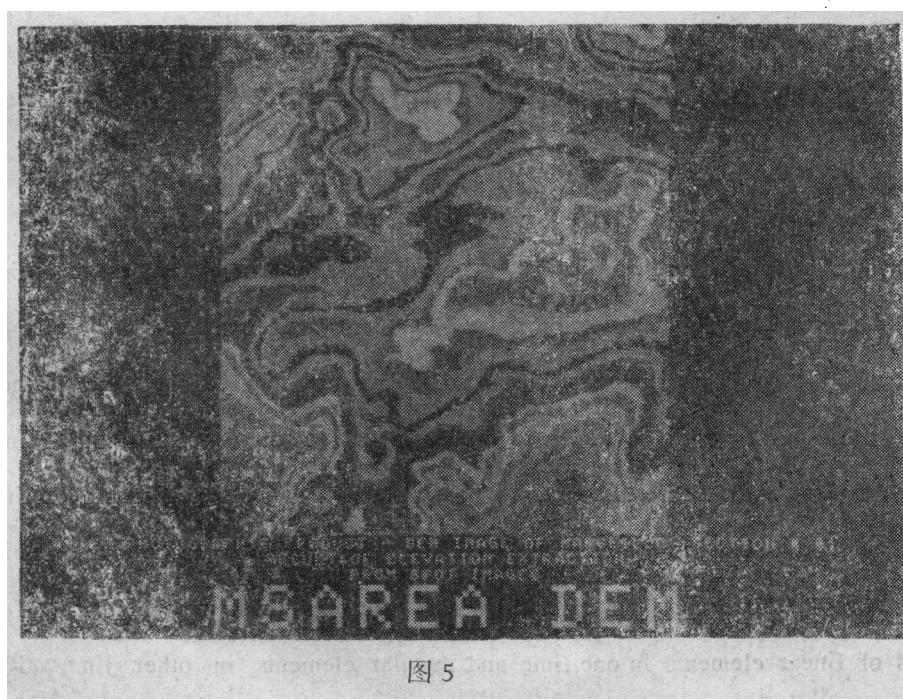


图 5

## 6 结 论

利用SPOT象对按全数字化方法提取高程信息是可行的。其关键是：精确选取控制点，在按时序变化模型解算外方位元素的过程中注意初值和等效焦距的确定方式，采取线元素和角元素分开解算迭代的方案，实现规则格网上的多级匹配，以一级匹配控制视差变化范围，以二级匹配建立基本视差格网，最后采用子象素精度的SLSM算法生成高精度同名点坐标文件，在切平面坐标系统内引入航测前方交会公式，顾及SPOT影象外方位元素时序变化的特点，进行规则格网上的高程计算，直接生成DEM数据。

总而言之，只要保证影象质量，全数字化自动提取高程可以达到10m高程精度。有了这个基础，将来在利用我国自己研制的资源卫星、侦察卫星修测与更新地图，充实国土基础数据库，以及为遥感应用提供辅助数据等方面，可望发挥积极作用。

### 参 考 文 献

- [1] 王之卓。摄影测量原理续编。北京：测绘出版社。1986。
- [2] 张祖勋，周月琴。SPOT卫星图象外方位元素的解求。武测科技，1988（2）。
- [3] 林宗坚。多重信息多重判据自适应影象匹配。武汉测绘科技大学学报，1988（4）
- [4] Ackermann F. High Precision Digital Image Correlation. 39th Photogrammetric Week, stuttgart, 1983.
- [5] Dowman I J. Digital Processing of SPOT Data, Proceeding on Fast processing of Photogrammetry Data. Switzerland, 1987.
- [6] Gugan D J, Dowman I J. Topographic Mapping from SPOT Imagery. PE&RS, 1988. 10.

### On the Extraction of Elevation Information from SPOT Imagery

Shu Ning Lin Zhongjian Tao Chuang

**[Abstract]** This paper has analysed theoretically the problems at the key link in the procedure for elevation extraction using SPOT imagery by means of fully digital approach and the proposed methods which are necessary and flexible. The mathematical model of time-sequential exterior to the geometric characteristics of SPOT imagery. It is very important to chose the precise control points and the reasonable preliminary value of exterior orientation elements of central line and to calculate the equivalent focal length. The iterations for calculating the elements must be performed for the solutions of linear elements in one time and angular elements in other time, i. e.

no solutions for both at the same time, just as the case in aerophotogrammetry. New approaches should be taken for data organization, avoiding the loss of precision during the interpolation of elevation after automatic correlations. According to satellite image characteristics, a strategy of multi-level matching are realized to improve the precision and the reliability, for which it is important to introduce the modified high accuracy least square matching algorithm. The results of the DEM generation using SPOT image windows in Marseille area show us that they can reach the elevation accuracy of 10m when the image quality can be assured.

**【Key words】** data organization, multi-level matching, elevation extraction