

# 多级 SPOT 立体影像匹配\*

陶 闯 林宗坚

(武汉测绘科技大学摄影测量与遥感系)

1991年2月7日收稿

## 摘 要

立体影像匹配是自动提取 SPOT 影像高程信息的关键技术。本文根据 SPOT 影像在几何构像关系和影像质量上的特点,提出了多级匹配的结构策略。实际像对匹配实验表明,多级匹配法具有较好的可靠性和精度水平,而且运算速度快,在快速生成 DEM 数据辅助遥感信息分析方面,有重要的应用价值。

**关键词** 影像匹配 影像配准 影像分割 最小二乘影像匹配

## 一、引 言

利用 SPOT 影像提取高程信息是 SPOT 应用的一项重要内容。目前这方面的研究主要在两个方向同时进行,即解析法处理和数字法处理。前者是在解析测图仪上进行人工立体量测,主要研究内容为解析测图仪开发并配置专用的 SPOT 解析处理软件(西德 Konechy 1986;法国 Denis 1986;英国 Dowman 1987;中国李德仁,1988;常本义,1989<sup>[1,2]</sup>)。后者则利用数字影像匹配技术识别同名影像点,即而解析出地面三维坐标(法国 Denis 1986;英国 Dowman, Gagan 1987;瑞典 Rosenholm, 1987;台湾 C. Chen, H. Lee, 1988<sup>[3,4]</sup>)。SPOT 原始影像是以数字形式记录的,因而数字法处理具有较好的数据基础<sup>[1]</sup>。在数字法处理中,影像匹配是高程信息提取的关键技术,同时它也是目前摄影测量界、遥感界及计算机视觉界的前沿课题。本文主要探讨基于 SPOT 立体影像的自动匹配技术。

## 二、多级匹配框架

目前,多数的 SPOT 影像匹配方法均采用了核线预处理措施<sup>[4]</sup>。然而 SPOT 影像成像几何关系较为复杂,不存在严格的核线几何关系<sup>[1,5]</sup>。因此,SPOT 的核线处理只能处理成近似核线的形式。实际中近似核线处理比较复杂,处理后的核线影像对,虽然匹配搜索在行方向上得到了控制,但搜索仍需二维方向上进行。本文从遥感卫片特点出发,探讨了一种未走核线处理之路的多级匹配方法,同样达到了在行方向限制匹配搜索范围的效果。图1为多级匹配框架略图。

在 SPOT 卫星影像中,地面起伏与卫星航高(832km)相比相对较小,这样影像中由

\* 本文为国家科委下达的专题“利用 SPOT 影像提取高程信息”课题的一部分。

于地面起伏引起的变形也相对较小,因此,卫星影像的视差格网应是较为平滑的。鉴于卫片像对的这种特点,多级匹配中充分利用了视差平滑性的约束条件,使得匹配具有较好的可靠性。

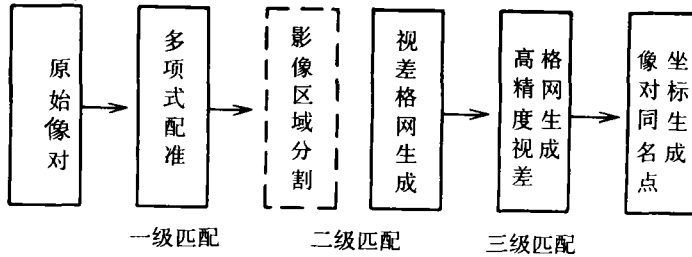


图 1 多级匹配框架略图

Fig. 1 Schematic frame of multi-level image matching

首先用简单的多项式进行立体像对间的配准处理,以控制像对间的视差变化范围。这一措施使视差格网更为平滑而且规则,达到了为后续匹配提供初值的效果,故称之为一级匹配。

卫星影像覆盖面积大,影像内容纷杂,用单一的匹配算法盲目地对整幅影像进行处理,在效率和可靠性上是不太合适的。为此,在二级匹配中,首先用影像区域分割技术将影像分为不同“性质”的区域,并建立相应的区域匹配控制文件,利用控制文件调配不同的算法或算法参数,协同地建立各区域的视差格网。由于一级匹配保证了两幅影像在整体形状上的相似,因此分割可只在一幅影像上进行。值得提出的是,这里的分割只提取较大面积的不同“性质”区域,不要求精确的区域界线定位。这一级处理一般采用像素级精度的匹配算法,且能够针对不同的区域调配相应的匹配技术。最后对各区域建立的相应视差格网进行整体平滑。上述二级匹配过程,笔者只进行了初步的尝试,许多问题还在进一步研究之中。

二级匹配后,已生成完整的格网视差文件,即可用以前交出该区域的 DEM。为了进一步地提高 DEM 数据高程精度,须进行高精度的子像素匹配。本文采用简化的最小二乘匹配算法(即 LSM-1)作为第三级匹配算子,试验证明该算法在各项性能指标上具有良好特性,精度可达 0.1 像素精度。

以上便是本文讨论的多级匹配方法,下面将分别介绍各级匹配处理过程。

### 三、一级匹配

一级匹配目的是为二级匹配提供良好的视差初值,并控制视差变化的范围,使匹配算法能在较小的范围内进行搜索,从而保障整体可靠性。本文采用了影像间的配准处理作为一级匹配的处理过程,即在影像对间分别选取一定数量的控制点,建立整体拟合多项关系式,用其中一幅影像(称为从属影像)对像对的另一幅影像(称为主影像)进行重采样配准处理。这种方法可以认为是一种二维控制视差变化的处理措施,即同时控制两个方向

(行、列)的视差;而核线处理则可认为是一种一维控制措施,即较严格地控制行方向的视差范围。

下面为两个 SPOT 像对窗的一级匹配情况:①法国马赛窗( $1024 \times 1024$ ),选九个控制点作二次多项式配准,控制点拟合精度为  $X = 0.93$  像素,  $Y = 0.35$  像素。检查点为  $X' = 2.04$  像素,  $Y' = 0.68$  像素。②宁乡窗( $1310 \times 1100$ ),左片以六个控制点对地图(1:5万)作纠正,纠正控制点精度( $X$ ) = 2.94 米, ( $Y$ ) = 1.24 米;然后右片对左片以八个控制点配准,控制点精度  $X = 0.37$  像素,  $Y = 0.32$  像素,检查点  $X' = 1.29$  像素,  $Y' = 0.57$  像素。

由此可见,这一处理过程简单、实用,而且较为有效。并具有以下特点:①保证了影像间整体结构形状相似,初值预测容易;②能整体上限制比例尺误差对匹配的影响;③利于区块分割辅助匹配过程实施,如匹配死区渡越;④可根据影像地形情况,采取分块配准措施,则效果会更好。此外,这一处理有利于快速生成 DEM 数据<sup>1)</sup>(如果左片对地图进行纠正,右片再对左片进行配准,这样纠正后影像呈近似正射状态,在纠正的影像上建立规则的格网,右片则匹配出对应的视差格网,最后沿规则网点进行前方交会,则直接生成了格网 DEM,这一处理避免了 DEM 内插过程,数据流程简单,并具有较好的精度,完全满足遥感数据分析中对高程基准精度的要求,是一项具有实用价值的技术)。

## 四、二级匹配

二级匹配是整个匹配过程的关键,其目的是生成可靠性好的像素级精度的视差格网。主要有如下两部分组成:影像区域分割和视差格网生成。

### 1. 影像区域分割

区域分割可分为二级水平:(1)匹配死区分割 所谓匹配死区是指云、雪覆盖区,水域以及大片阴影区等面积较大区域,在这些区域匹配算法将无法进行,因为容易导致匹配误差或匹配中断。所以,匹配时须渡越死区。在 SPOT 影像中,经常出现这类死区,故这一级分割处理是必要的。(2)特征区域分割 这是指将影像分割为与匹配相适应的“特征”区域,从而有效地调配不同算法实施匹配,提高整体匹配过程的可靠性和效率。这一级处理是针对较复杂或影像质量较差的遥感影像而言。如将影像分割为地形起伏小的城区和起伏较大的山区,对前者可采用特征结构匹配法,如林宗坚法<sup>[6]</sup>,对后者则须采用顾及几何变形的特征匹配法,如桥模式法<sup>[7]</sup>。

上述二级分割过程与目前的 DEM 存储技术相适应,死区分割可辅助 DEM,内插时顾及死区的影响,特征区分割则类似于 DEM 的选择采样技术。所以分割引导的匹配是有利于 DEM 存储的。本文所述的分割并不要求精确的边界,但必须高效而快速,否则不能提高整体匹配过程的效率。

从这一特点出发,设计了一种基于种子区的区域生长分割算法(见图 2),其过程为种子区选择和区域生长两阶段。

1) 舒宁、林宗坚、陶闯,“利用 SPOT 影像提取高程信息”课题研究报告,武汉测绘科技大学出版社,1990.9.

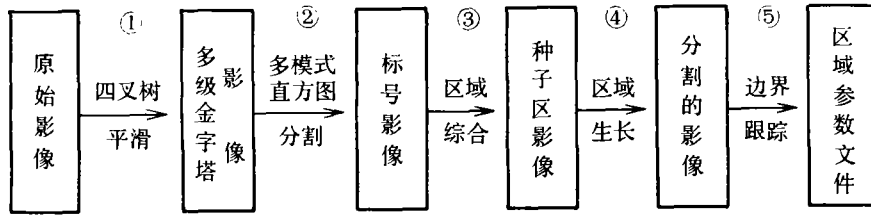


图 2 基于种子区区域生长算法

Fig. 2 Seed area based region growing algorithm

①四叉树平滑 通过四叉树平滑可生成多级金字塔影像:

$$Q(i, j, k) = \frac{1}{4} [Q(2i, 2j, k-1) + Q(2i+1, 2j, k-1) \\ + Q(2i, 2j+1, k-1) + Q(2i+1, 2j+1, k-1)]$$

$Q(i, j, 0) = I(i, j)$ 为原始影像。 $k$ 为金字塔级数。文献[8]中证明这种平滑可降低类内方差但同时引入了类间偏差。本文采用区域生长以弥补此偏差。

②多模式直方图分割 由于类内方差降低,在级数较高的金字塔影像中(当 $k=4$ 或 $5$ 时),原始影像面积较大的相似区域,才能表现出一定的灰度分布,小面积区则被平滑掉,因此金字塔影像可形成较明显的多模式(即多峰谷)的直方图,由此峰值对应的区域即为原始影像大面积相似区的种子区(图版1,图3(b)–(d))。

③种子区综合 ②中分割的种子区(已经标号)在原始影像上会出现某些零星非种子区斑块,或者种子区内部不纯的情况(图版1,图3(d))。这将影响后续区域生长的结果,为此需进行标号区综合,当标号区面积小于指定的最小面积阈值时,该区域被周围的较大面积区吞并。

④区域生长 在种子区文件上,搜索种子区边界,在边界上进行区域生长,生长的测度为:

(a) 相邻像素灰度差测度:  $|p - q| < T_1$ ,  $p, q$  为相邻像素灰度值。 $T_1$  为阈值。

(b) 相邻像素各自  $3 \times 3$  邻域灰度均值测度:  $\frac{1}{2} |\bar{p} + \bar{q}| < T_2$ 。  $\bar{p}, \bar{q}$  为各自  $3 \times 3$  邻域均值,  $T_2$  为阈值。

(c) 相邻像素各自  $3 \times 3$  邻域纹理测度:  $|\tilde{p} - \tilde{q}| < T_3$ 。  $\tilde{p} = \frac{1}{8} \sum |p - \tilde{p}|$ ,  $\tilde{q} = \frac{1}{8} \sum |q - \tilde{q}|$ ,  $T_3$  为阈值。上述三种测度只要满足一个即进行生长,图版1,图3(e)为③

④处理结果,其中  $T_1 = 5$ ,  $T_2 = T_3 = 3$ 。

⑤区域参数文件建立 为使分割结果用于引导匹配,必须建立区域参数文件。该文件为三级索引结构(如图4)。与匹配视差文件一起作为最后的输出结果,可用于辅助后续 DEM 处理。

①–③为种子区选择过程,如果不进行特征区分割处理,也可直接由人工选择死区种

子点,仍启动④程序完成死区提取。如果获取的影像质量比较好,无需进行影像分割,则可以跳过此处理过程,故图 1 中以虚线框表示。

### 2. 视差格网生成

在左影像上建立规则的目标格网,一般取  $8 \times 8$  像元间隔。然后从区域参数文件中读取目标格网点的类别值,同时建立匹配控制文件,该文件对每个格网点依类别值进行标记,如为死区中点即标记 0。后续的匹配算法在控制文件的引导下,对不同标记的目标点采用不同的匹配处理方法。若无区域参数文件,则各点同等对待处理。

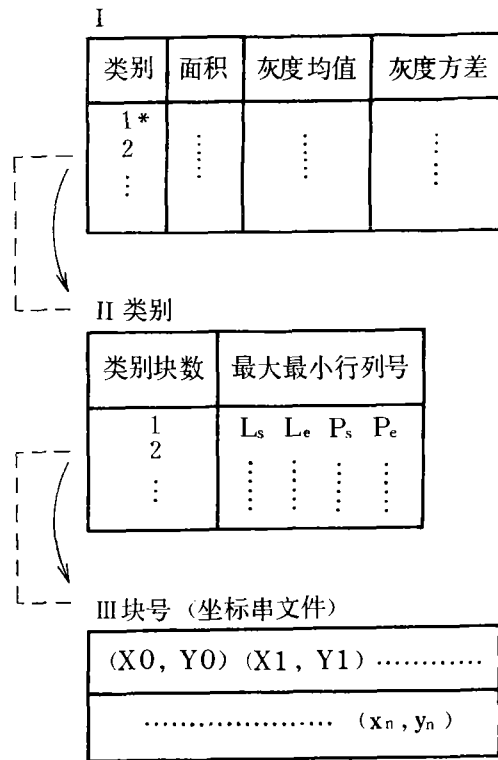
由于一级匹配实施的是二维控制视差变化的措施,故二级匹配相应地采用了二维匹配的算法。根据一级匹配结果,本文采用了  $11 \times 7$  的目标区,进行二维搜索匹配,搜索范围为左右各 3 个像元,上下各 1 个像元。实际影像中大部分点均位于此搜索范围内,个别超出点可由第三级匹配补救。匹配是以规格化的相关系数为主的多重判据进行<sup>[6]</sup>,同时辅有多频道匹配处理措施。

最后,对匹配生成的视差格网进行可靠性处理,它包括三个过程,由周围视差值内插死区点、失配点视差以及沿纵横方向交替进行滑动拟合视差断面。本文以五点三次多项式拟合平滑,当拟合差值大于 3 倍差值中误差时,该点认为是相差点,其值由拟合值取代。上述可靠性处理的依据是由卫片视差的平滑性以及一级匹配影像间相对变形的平滑性等影像条件所确定的。二级匹配生成了可靠性较好的像素级精度的视差格网。

此视差格网文件加上偏移量即可转换为影像同名点行列号,再通过配准多项式的逆变换,就恢复为原始影像的同名点行列号,经前方交会解算,便生成了各点的三维地面坐标。

## 五、三级匹配

为了进一步提高生成的 DEM 高程精度,须建立更高精度的视差格网。最小二乘影像匹配算法(LSM)是目前较为有效的高精度匹配算法,它以参数估计来拟合两影块之间的几何畸变和灰度畸变,并解求影块之间的相对变形量,此变形量即可转换为  $x、y$  方向的视差量<sup>[9]</sup>。



\* 类别 1 代表匹配死区  
图 4 区域参数文件结构

Fig. 4 Structure of region parameter file

但 LSM 有两项致命的弱点: 拉入范围小, 一般为 1.5 个像元, 匹配时需提供较好的初值; 其次, 平差迭代中涉及参数较多, 匹配非常耗时, 约每点需 3—5 秒钟时间。因此 LSM 不能作为三级匹配算子。经过大量的实验研究和理论分析得出, LSM 虽具有附加参数的完整性, 但其算法指标并非优越, 尤其在小窗口条件下, 参数间相关性问题和过渡化问题明显, 影响了算法质量和精度。为此, 本文采用了简化的 LSM 算法 (LSM-1), 其模型为:

$$V_1 = h_0 + h_1 \times G_s(x, y) - G_m(x, y) \quad (1)$$

$$V_2 = G_s(x + dx, y + dy) - G_m(x, y) \quad (2)$$

这里,  $G_s$ 、 $G_m$  分别为目标窗口和搜索窗口的灰度矩阵,  $h_0$ 、 $h_1$  为辐射改正参数,  $dx$ 、 $dy$  为视差移位量。上式即为仅顾及移位量和线性辐射畸变参数的 LSM 模型。解算中, 采用 (1)、(2) 式交替迭代的方法, 窗口重采样以双线性查找表算法进行, 迭代收敛控制条件为: (a) 两窗口相关系数大于给定阈值 (如 0.98)。 (b) 相关系数小于前一次相关系数值。 (c) 迭代次数大于给定极限值 (如 5 次)。 (d) 中误差超过估计最大值 (如 0.3 像素)。 (e) 某一次迭代计算出的视差移位量大于 3 像素。 (f) 迭代计算的  $dx$  和  $dy$  均小于 0.05 像素。当满足上述任一条件时, 则迭代结束。

表 1 为 LSM 和 LSM-1 匹配对比实验结果, 表中数据为 119 个点测试的平均结果。经实验得出, LSM-1 对初值好坏的敏感性不大, 拉入范围可达 3—5 像素; LSM-1 在匹配窗口大小变化的情况下, 精度变化较为平稳, 基本保持在 0.1 像素左右; 更为突出的是, LSM-1 匹配速度很高, 迭代次数少, 与 LSM 相比, 平均 CPU 耗时为 1:16.5。由于以上特点, LSM-1 算法可作为第三级匹配算子。

表 1 LSM 与 LSM-1 对比实验结果

Fig. 1 Result of test for comparison LSM with LSM-1

窗口尺寸大小	LSM			LSM-1		
	平均迭代次数	平均 CPU 耗时(秒)	平均精度(像素)	平均迭代次数	平均 CPU 耗时(秒)	平均精度(像素)
9×9	3.00	1.64	0.19	3.00	0.12	0.14
13×13	5.30	2.73	0.13	2.83	0.16	0.11
17×17	5.20	4.02	0.09	2.58	0.23	0.09
25×25	4.40	6.85	0.06	2.57	0.39	0.08
33×33	4.80	10.73	0.05	2.68	0.60	0.06

## 六、影像匹配质量评价

采用本文上述方法, 对几个地区的 SPOT 像对窗进行了匹配实验, 匹配质量评价如下:

①格网点匹配后相关系数数值分布评价 对湖南宁乡地区像对窗 (1310 × 1100) 经二级匹配后, 其相关系数分布大于 0.9 的点占 47.4%, 大于 0.6 的点占 95.8%; 三级匹配后, 大于 0.9 的点占 63.9%, 大于 0.6 的点占 99.3%。一般认为, 相关系数在 0.6—0.7 以上

的点即认为是成功点。

②视差格网点 LSM-1 匹配精度评价 这里的精度是指 LSM-1 匹配算法平差内精度估值。对法国马赛地区像对窗( $1024 \times 1024$ ) 计算结果为 0.102 像素, 宁乡窗为 0.997 像素。

③多级匹配与人工立体量测结果对比 将多级自动匹配生成的同名点坐标与人工在立体坐标仪上立体量测结果进行对比, 马赛窗中误差 (以人工量测值为真值) 为 0.41 像素, 最大差值 1.75 像素, 宁乡窗中误差 0.73 像素, 最大差值 1.98 像素。

④利用匹配结果自动生成 DEM 精度评价 由于 DEM 精度还涉及到方位元素的解算精度, 这里仅给出初步的评价。马赛窗方位元素解算精度较好, 因而在 23 个前交点上, X、Y、Z 三个方向中误差均小于 10m, 匹配生成的等高线图与解析测图 C-130 上所测的同一地区等高线图<sup>[2]</sup>非常吻合。

⑤匹配速度情况 目前我系已开发了基于多级匹配的 RIMS 软件包, 主语言为 FORTRAN 77, 宿主机型为 VAX-11/750。对一块宁乡窗( $300 \times 512$ ) 速度测试结果, 其二级匹配需 93 秒钟, 三级匹配需六分半钟。由此可见, 多级匹配运算效率相当高。

## 七、结 语

本文的试验研究表明: (1) 根据遥感影像成像几何特点, 采用像对间分块配准处理, 达到了二维视差变化的整体控制, 从整体匹配过程看, 该方法保障了可靠性, 同时使运算

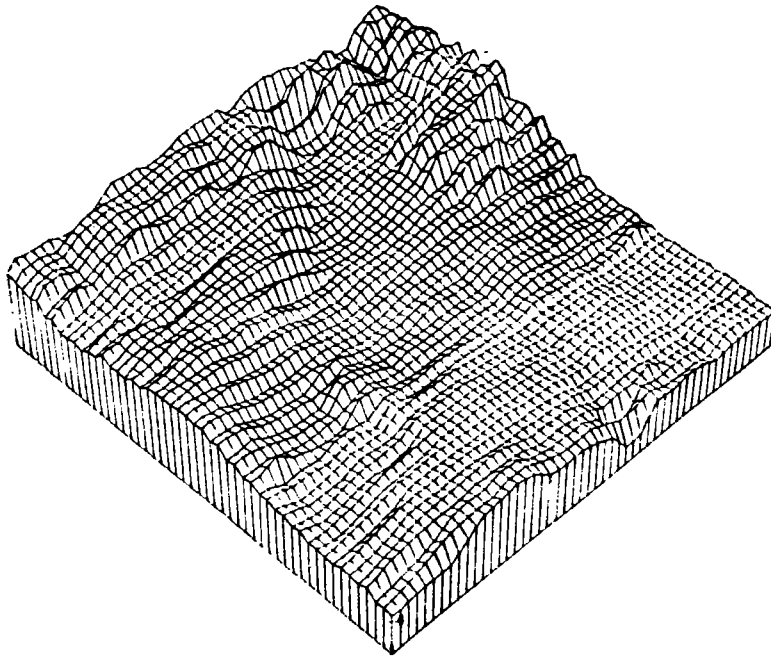


图 6 DEM 透视图

Fig 6. Perspective View of DEM

过程得到大量简化;(2)用影像分割技术区分不同“性质”的影像块,以便采取不同的匹配策略,提高整体匹配过程可靠性和效率,是一项值得进一步探讨和研究的技术,文中所提出的匹配死区概念,在卫片匹配中值得注意;(3)附加参数选择是影响最小二乘匹配质量的一个主要问题,应根据实际数据条件以及不同的应用目的和质量指标,适宜地选择平差参数;(4)多级匹配策略,思路连贯,层层结合,后级处理总是以前一级结果为基础,具有较高的整体可靠性和精度水平,而且运算速度很快。封3图5为马赛窗多级匹配结果。图6为生成的部分数字高程模型透视图。

一级匹配中关于自动配准处理以及分块配准技术的实施,如何与不同的影像条件相适应问题尚需进一步研究,二级匹配中的统筹调配匹配方法仍值得探讨商榷。

### 参 考 文 献

- [1] I. J. Dowman, Digital processing of SPOT data, Proceeding on Fast processing of photogrammetry data, Switzerland, 1987.
- [2] 李德仁等, SPOT 影像的解析摄影测量处理,武测学报, No.4, 1988。
- [3] D. J. Gagan, I. J. Dowman, Topographic mapping from SPOT Imagery. Photogrammetry engineering and Remote sensing, Oct. 8, 1988.
- [4] T. Day, J. P. Muller, Quality assessment of digital elevation models produced by automatic stereo matchers from SPOT image pairs, International Archives of ISPRS III Congress, Kyoto, 1988.
- [5] 周月琴, SPOT 影像近似核线处理,武汉测绘科技大学, 1988。
- [6] 林宗坚, 多重判据多重信息影像匹配, 武汉测绘科技大学, 1988。
- [7] 张祖勋, 新的核线相关法——跨核法, 武测学报, No.4, 1988。
- [8] R. Wilson, M. Spann, Image Segmentation and Uncertainty, Springer-Verlag, England, 1988.
- [9] F. Ackermann, High precision Digital Image Correlation, the 39 Photogrammetric Week, Westgermany, Stuttgart, 1983.

## Multi-Level Image Matching for SPOT Stereo Data

Tao Chuang Lin Zongjian

(Wuhan Technical University of Surveying and Mapping)

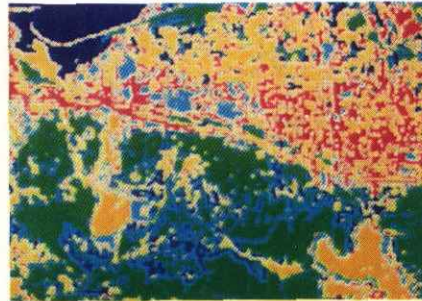
### Abstract

Stereo image matching is the key link in extracting elevation information from SPOT data. Based on the SPOT data analysis of the geometric and the image quality, a new method of multi-level image matching are proposed. Experiments in real image pairs show that, using the method, not only the good precision and the reliability are obtained but also the processing speed is high. The new method can be used to rapidly generate DEM for remote sensing data analysis.

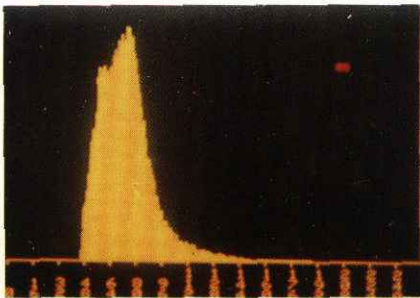
**Key words** Image matching Image registration Image segmentation Least squares image matching.



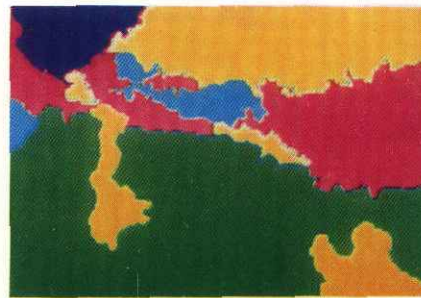
(a) 原始影像



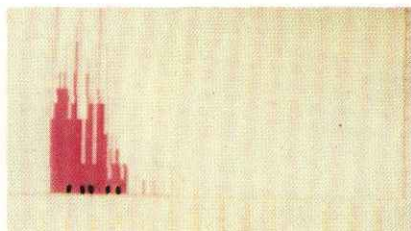
(d) 种子区 ② 分割后影像



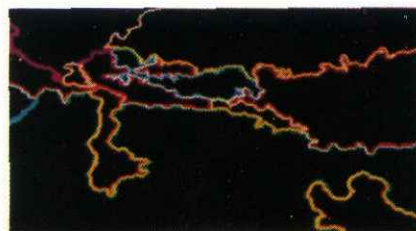
(b) 原始影像直方图 (无明显峰谷)



(e) 区域生长后结果



(c) 第五级金字塔影像直方图  
(有五个明显峰谷)



(f) 区域边界跟踪后结果

图 3 影像分割结果

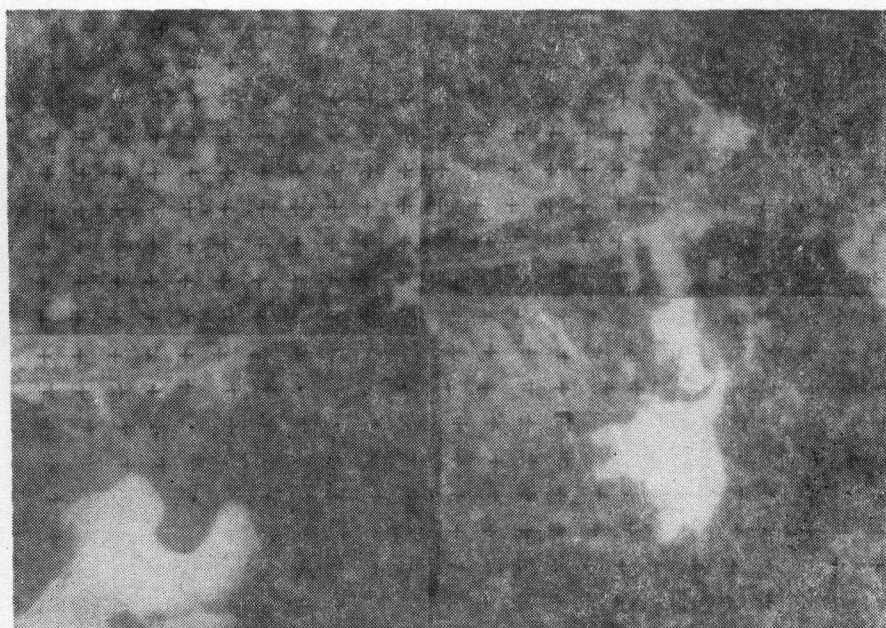


图 5 多级匹配结果

图中“+”字丝标记为同名点,下片中的个别小黑点为内插点。  
由图清晰可见,视差格网越过了死区。上为左片,下为右片