

航摄影象数字相关的一个试验

林宗坚

【提要】 这是一篇关于航测核线影象数字相关的实验报告，主要讨论了如下几个问题；〈1〉从扫描系统到核线系统的影象变换；〈2〉通过影象预处理增强对相关有益的特征；〈3〉带阈值的绝对差值总和的影象匹配算法；〈4〉用卷积算法剔除相关结果中的粗差；〈5〉由地形坡度引起的影象配准误差及目标区最佳尺寸分析。

一 概 述

影象相关是实现摄影测量自动化中的一个关键环节。本试验之目的在于研究离线数字影象相关的一些技术问题，尤其是如何减少运算工作量及提高结果可靠性的问题。

用于本试验的基本资料是一对航摄影象片。象片的扫描用西德汉诺威大学的 Optronic 扫描仪进行。扫描时用的象片尺寸及取样间隔在 x、y 方向均为 $25\mu\text{m}$ ；经过核线排队后合并为 $50\mu\text{m}$ 供相关计算用。表 1 所列为扫描象片的若干参数。图 1 所示为该象片的扫描部分 (5 × 5 cm)。图 2 为影象灰度的统计分布曲线。

表 1 扫描象片参数

象片特征	象片尺寸 象片主距 象片比例尺 地形类别	230 × 230 mm 152.77 mm 1 : 40000 丘陵
扫描参数	取样间隔 (x 和 y 向) 象元尺寸 (x 和 y 向) 扫描面积 灰度量级	$25\mu\text{m}$ $25\mu\text{m}$ 50 × 50 mm 256

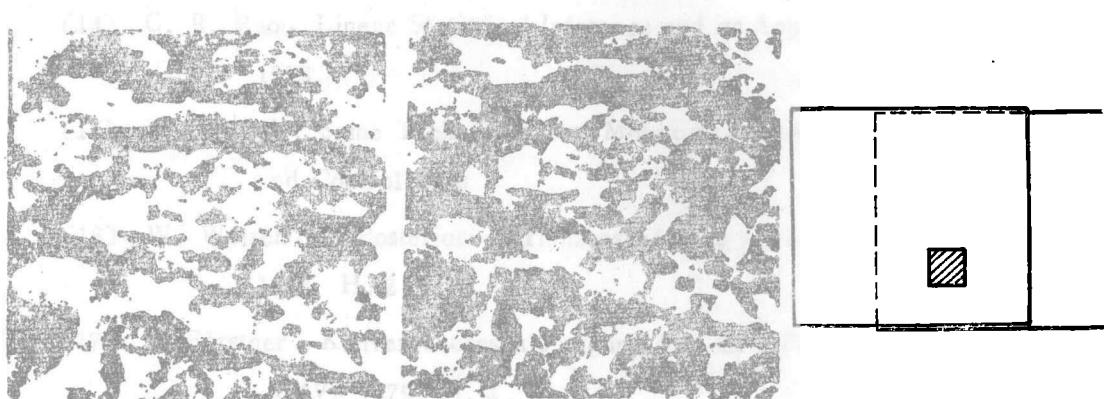


图 1 立体象对的扫描部分

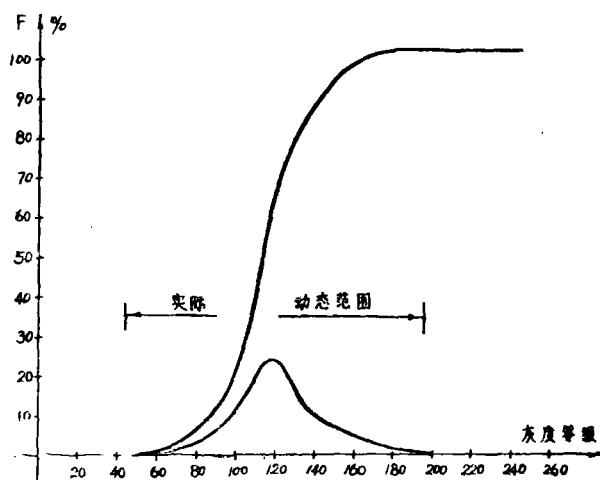
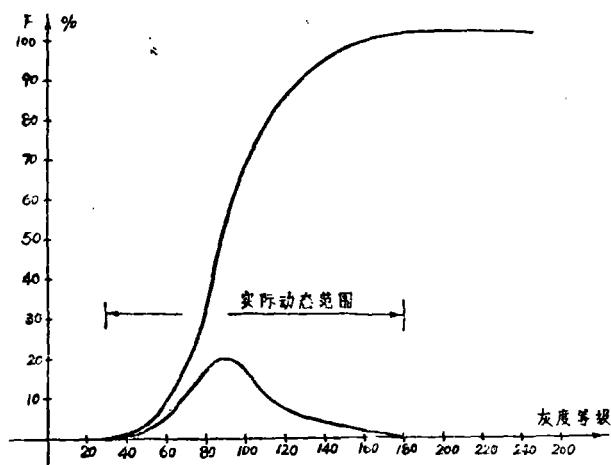


图 2 影象灰度的统计分布曲线

相关沿核线进行。从象片数字化到地面数字模型 (DTM) 的整个过程如图 3。

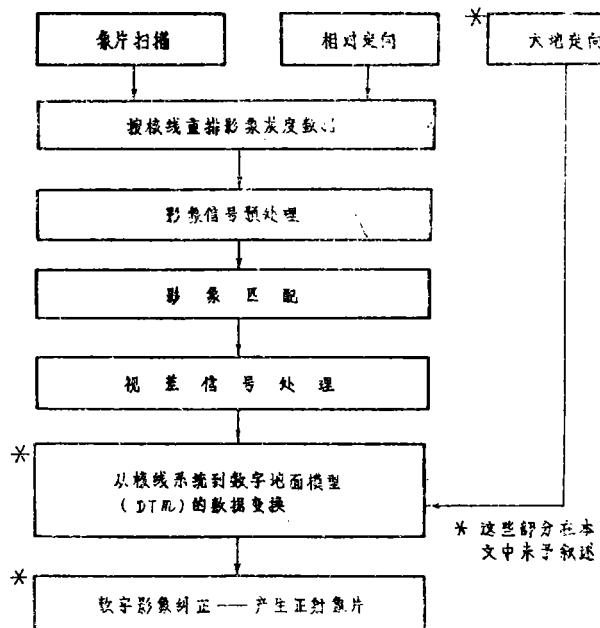


图 3 过程框图

二 按核线重排影象灰度数据

原始影象的灰度数据是沿扫描仪 x 方向排列的。为了便于核线相关，必须按核线关系对所获得的数字影象作重新排列或重新取样。这实质上是一个数字影象的几何纠正问题。纠正的方法可以是直接式的——从扫描系统到核线系统；也可以是间接式的——由核线系统反求寻找原始影象〔文献 1〕。下面推导的是本试验采用的间接法公式。

设核坐标系为 $u_i, v_i, -f$ (见图4a), 象片坐标系为 $x_p, y_p, -f$, 两者之关系可用共线方程表示为

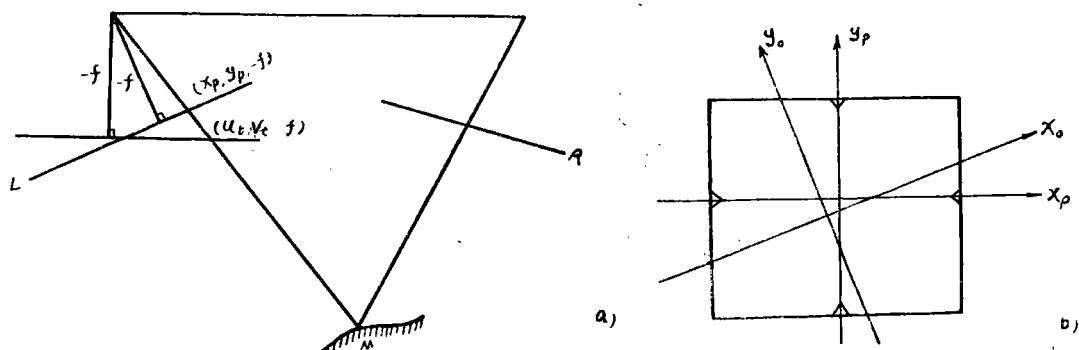


图 4 坐标系统变换

$$x_p = -f \frac{a_1 u_1 + b_1 v_1 - c_1 f}{a_3 u_1 + b_3 v_1 - c_3 f}$$

$$y_p = -f \frac{a_2 u_t + b_2 v_t - c_3 f}{a_3 u_t + b_3 v_t - c_3 f} \quad (1)$$

其中, f 为象片主距, $a_1 \cdots c_3$ 为象片旋转参数, 可由空中三角测量获得。

对于某一特定核线上的所有点, v_t 为一常数。设沿核线再取样的间隔为 Δ , 则 u_t 可以表示为

$$u_t = N \cdot \Delta \quad (2)$$

这里 $N = 1, 2, 3 \cdots m$ 为沿核线的象元编号。

式 (1) 因此可化简为

$$x_p = \frac{N \Delta_1 + \xi_1}{N \Delta_3 + 1} \quad (3)$$

$$y_p = \frac{N \Delta_2 + \xi_2}{N \Delta_3 + 1}$$

其中 $\Delta_1, \Delta_2, \Delta_3, \xi_1, \xi_2$, 对某一特定核线为一组常数, 可由象片参数及核线坐标 v_t 确定之。

$$\begin{aligned} \xi_1 &= -f \frac{b_1 v_t - c_1 f}{b_3 v_t - c_3 f} \\ \xi_2 &= -f \frac{b_2 v_t - c_2 f}{b_3 v_t - c_3 f} \\ \Delta_1 &= -f \frac{a_1 \Delta}{b_3 v_t - c_3 f} \\ \Delta_2 &= -f \frac{a_2 \Delta}{b_3 v_t - c_3 f} \\ \Delta_3 &= -f \frac{a_3 \Delta}{b_3 v_t - c_3 f} \end{aligned} \quad (4)$$

式 (3) 即所谓的交比定律形式, 与 T.J. Keating [文献 2] 几何推导的结果是一致的。从象片坐标 x_p, y_p 到扫描坐标 x_0, y_0 的变换 (见图 4b) 可以表示为

$$\begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_p \\ y_p \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c_x \\ c_y \end{bmatrix} \quad (5)$$

其中参数 A, B, C, D, c_x, c_y 对于整张象片是一组常数, 可以借助象片框标测定值来确定。

将式 (3) 代入式 (5), 我们可得到一个简炼的影象纠正计算式:

$$\begin{aligned} x_0 &= \frac{N(A \Delta_1 + B \Delta_2) + (A \xi_1 + B \xi_2)}{N \Delta_3 + 1} + c_x \\ y_0 &= \frac{N(C \Delta_1 + D \Delta_2) + (C \xi_1 + D \xi_2)}{N \Delta_3 + 1} + c_y \end{aligned} \quad (6)$$

或表示成交比形式

$$x_0 = \frac{N E_1 + E_4}{N E_3 + 1}$$

$$y_0 = \frac{NE_2 + E_5}{NE_3 + 1} \quad (7)$$

其中 $E_1 \dots E_5$ 对于某一特定核线是一组常数。

$$\begin{aligned} E_1 &= A\Delta_1 + B\Delta_2 + C_x\Delta_3 \\ E_2 &= C\Delta_1 + D\Delta_2 + C_y\Delta_3 \\ E_3 &= \Delta_3 \\ E_4 &= A\xi_1 + E\xi_2 + C_x \\ E_5 &= C\xi_1 + D\xi_2 + C_y \end{aligned} \quad (8)$$

式(7)建立的是核线系统的新取样点(N, V_t)与扫描系统的点(x_0, y_0)间的几何对应关系。但是,点(x_0, y_0)不一定是原采样点,其灰度值需由邻近采样点来内插。最简便的内插法是所谓的最近邻元法,即

$$\left\{ \begin{array}{l} N_x = \text{Integer}\left(\frac{x_0}{\Delta_x} + 0.5\right) \\ N_y = \text{Integer}\left(\frac{y_0}{\Delta_y} + 0.5\right) \\ \text{Density}(N, V_t) = \text{Density}(N_x, N_y) \end{array} \right. \quad (9)$$

这里, Δ_x, Δ_y 为 x, y 向扫描取样间隔, 本试验中 $\Delta_x = \Delta_y = 25\mu\text{m}$ 。Integer 表示取整数运算。Density(N_x, N_y)为扫描采样点灰度, Density(N, V_t)为核线上新取样点的灰度。

如果最近邻元法的精度不满足要求, 可采用双线性内插法。本试验中由于原扫描取样间隔已达 $25\mu\text{m}$ (为相关象元尺寸之半)。所以用最近邻元法已经能满足精度要求。

三 影象信号的预处理

只有相似性良好的影象(信号)才能获得良好的相关结果, 然而实际上由于种种原因(几何的与光度的), 左右象片上的共轭影象并不完全相似。图5所示为一个地面标志点及其在左右象片(负片)上的影象。地面标志是全白色的十字形, 然而左右影象都不是很规则的十字形, 且左右差别相当大, 其中有些几何因素, 但主要是由于左右象片接受的光量不均的结果。如果把这些杂乱的信号直接用以作精细的相关, 其结果必然含许多错误, 且耗费大量计算时间。

影象的几何变形可以通过一些适当措施加以纠正, 前述的几何纠正及后面第六节将提及的地形调制都是为此而考虑的。但是, 光度学的即信号强度的畸变, 至今尚无有效的纠正措施。实际上要把它当作噪声来处理。影象信号预处理的任务就在于滤除噪声或增强对相关有

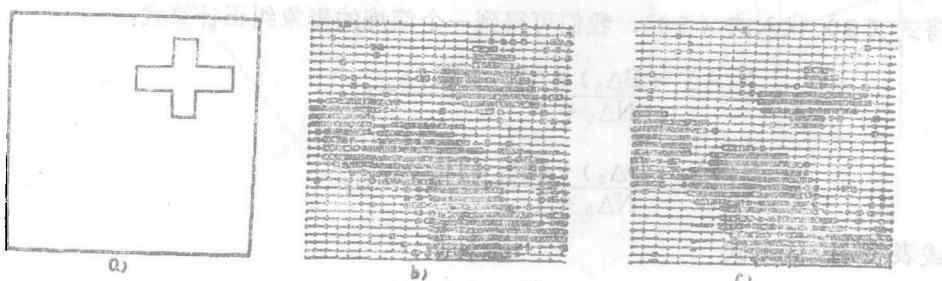


图5 地面标志点影象

益的特征，以简化相关运算及提高可靠性。

(1) y 向平滑

在人工立体观测中我们已有这样的经验，对于 y 向视差量测（例如作相对定向），我们要尽力寻找在 y 方向有明显变化的影象；而对于 x 向视差量测，则尽力寻找在 x 向有明显变化的影象。现在我们的任务仅在于确定 x 向视差。这时候影象在 y 方向的变化仅仅起到某种参考作用。尽管从信息保真度的观点出发〔文献 3〕，y 方向也应当有相当高的取样频率、甚至与 x 方向一样。但是实际上影象的高频成分一般较弱、往往与前述的光度畸变影响相渗在一起，而后者对影象匹配有严重的干扰作用。既然前者无关紧要，我们就可以采用简单措施把两者统加滤除。这样做，通过牺牲一些 y 向信息以换取左右核线信号相似性的改善，对一维核线相关尤其有益。当然滤波器的截止频率也不能过低、否则信息损失过多，也会影响相关精度。就本试验资料情况，我们比较过〔1 1〕、〔1 1 1〕和〔1 1 1 1 1〕三种 y 向平滑算子、其中以〔1 1 1〕效果最好。即

$$S_{(1, j)} = V_{(1, j)} + V_{(1, j+1)} + V_{(1, j+2)} \quad (10)$$

式中， $V_{(1, j)}$ 为原影象信号， $S_{(1, j)}$ 为 y 向平滑后的信号。

(2) 核线信号预处理

核线信号处理是单独地对每一条核线进行，其目的在于抽取在 x 方向有显著变化且具强信噪比的信息成份，即边缘特征。这要通过滤波与阈值逻辑处理两步骤来完成。

(I) 滤波

差分算子〔1 - 1〕是众所周知的影象边缘检测的有效工具〔文献 6〕，将该算子作自身卷积可得二阶差分算子（又称 Laplacian 算子）：

$$[1 \quad -1] * [1 \quad -1] = [1 \quad -2 \quad 1] \quad (11)$$

及三阶差分算子

$$[1 \quad -2 \quad 1] * [1 \quad -1] = [-1 \quad 3 \quad -3 \quad 1] \quad (12)$$

将二阶差分及三阶差分算子与各种平滑算子组合，可构成各种不同形式的滤波器、以适于各种不同频段的边缘特征提取。

如同其它许多现成的相关方案一样，本试验也采用了所谓多阶层（hirachical）或称多频道的相关方法〔文献 4〕，亦即在高阶层（低频道）采用粗象元在较大范围搜索，而后逐层控制，在低阶层（高频道）采用细象元在较小的范围内搜索。高阶层的影象数据是由次低阶层的两个象元灰度取简单平均而得（见图 6）

$$S_{(1)}^{k+1} = [S_{(2, 1-1)}^k + S_{(2, 1)}^k] / 2 \quad (13)$$

或忽略比例因子 $\frac{1}{2}$ ，而写成

$$S_{(1)}^{k+1} = S_{(2, 1-1)}^k + S_{(2, 1)}^k \quad (14)$$

式中， $I = 1, 2 \dots n$ 为象元序号。 $k = 0, 1, 2 \dots$ 为阶层编号。 $S_{(1)}^0$ 即原始影象序列。

把上述的差分算子与多阶层数据结构两种措施在运算上结合就形成了下列适用于各种频道的滤波器。

(a) 含〔1 - 2 1〕的二阶差分型滤波器：

$$[1] * [1 \quad -2 \quad 1] = [1 \quad -2 \quad 1]$$

$$[1 1] * [1 \quad 0 \quad -2 \quad 0 \quad 1 \quad 0] = [1 \quad 1 \quad -2 \quad -2 \quad 1 \quad 1]$$

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & -2 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \\
 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & -2 & -2 & -2 & -2 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (15)$$

(b) 含 $[-1 \ 3 \ -3 \ 1]$ 的三阶差分型滤波器

$$\begin{aligned}
 & \begin{bmatrix} 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} -1 & 3 & -3 & 1 \end{bmatrix} \\
 & = \begin{bmatrix} -1 & 3 & -3 & 1 \end{bmatrix} \\
 & \begin{bmatrix} 1 & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} -1 & 0 & 3 & 0 \end{bmatrix} \\
 & - \begin{bmatrix} 3 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \\
 & = \begin{bmatrix} -1 & -1 & 3 & 3 & -3 \end{bmatrix} \\
 & - \begin{bmatrix} 3 & 1 & 1 \end{bmatrix} \\
 & \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} * \\
 & \quad \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 3 & 0 & 0 & 0 & -3 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \\
 & = \begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 & -1 & 3 & 3 & 3 & -3 & -3 & -3 & -3 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (16)
 \end{aligned}$$

图 7 所示为上述两种类型滤波器的幅度谱形式。其中 T 的意义是基波周期, 实即滤波器宽度。例如, 当象元尺寸为 $50\mu\text{m}$ 时, 滤波器 $[-1 \ -133 \ -3 \ -311]$ 的宽度 $T = 8 \times 50 = 400\mu\text{m}$ 。在这里值得注意的是最低层的相关频率。按 U. V. Helava 的分析 [文献 5] 为了获得精确结果, 用于最低阶层相关的最佳频率必须在 $5 \sim 10$ 线对/毫米的范围内。上述两种滤波器也应当考虑使其通频带能符合最佳频率范围。(图 8) 对

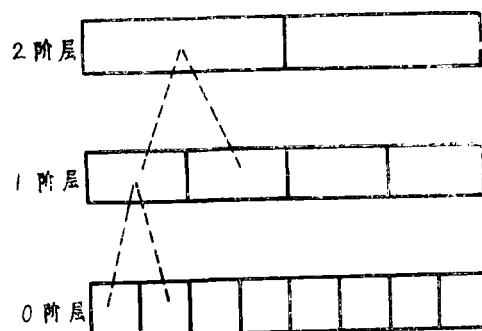


图 6 多阶层数据结构

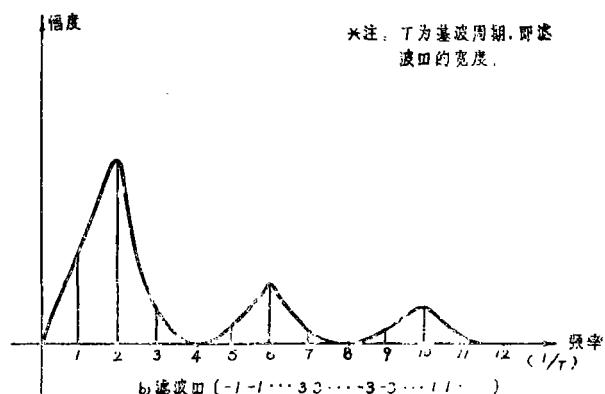
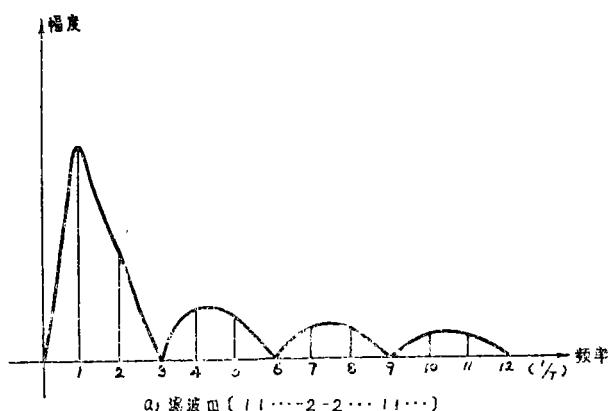


图 7 两种滤波器的幅度谱

图 8 最佳相关频率

于二阶差分型滤波器, 我们可取 $[1 \ -2 \ 1]$ 作最低阶层信号滤波, 这时 $T = 3 \times 50 = 150\mu\text{m}$, $1/T = 1000/150 = 6.6$ 线对/毫米, 由图 7a 知, 其最强通带的中心约在 $1/T = 6.6$ 线对/毫米附近, 符合最佳频率范围。而对于三阶差分型滤波器, 因为这时 $T = 8 \times 50 = 400\mu\text{m}$

$1/\tau = 2.5$ 线对/毫米, 由图 7b 知, 其最强通带中心约在 $2/\tau = 5$ 线对/毫米、基本上也能满足要求。

(II) 阈值逻辑处理

上述的各种滤波作用仅完成了对影象边缘特征的检测, 而特征强弱的判断及对低信噪比弱特征的抑制还须经下列的逻辑处理。

$$S_{(1)} = \begin{cases} 0 & \text{当 } |S_{(1)}| \leq \sigma_{th} \\ S_{(1)} & |S_{(1)}| > \sigma_{th} \end{cases} \quad (17)$$

上式中的 $S_{(1)}$ 是经过滤波后的核线信号。 σ_{th} 是逻辑判决的阈值, 它可以是固定的, 也可以是浮动的。

(a) 固定阈值

如果我们已经有一些关于影象噪声水平的先验知识, 则滤波后逻辑判决的阈值就可推算而得。例如、设原始影象的噪声水平的标准差为 σ_n , 则经过滤波器 [1 - 2 1] 后

$$\sigma = [1 + (-2)^2 + 1] \sigma_n = \sqrt{6} \sigma_n \quad (18)$$

阈值可按下式确定为

$$\sigma_{thL} = \kappa_L \sigma = \kappa_L \sqrt{6} \sigma_n \quad (19)$$

一般 κ_L 可取 2 ~ 3, 即取限差为标准差的 2 或 3 倍。

类似地、对滤波器 [-1 3 -3 1] 可取

$$\sigma_{thB} = \kappa_L \sqrt{20} \sigma_n \quad (20)$$

(b) 浮动阈值

在进行信号滤波的同时, 一段核线上信号强度的平均值是很容易求得的。据此可设立随信号强弱而浮动的阈值。

$$\sigma_{var} = K_v \cdot S_{mean} \quad (21)$$

式中 S_{mean} 是经过滤波后信号强度绝对值的平均值。 S_{mean} 可以对每一段核线求一次, 也可以在某一面积范围内仅求第一段核线为代表。 K_v 是取决于影象反差类型的一个常数, 一般可取 $K = 0.5 \sim 1$ (这时大约有 $\frac{1}{3}$ 的弱特征被舍弃)。

上述两种阈值可结合并用, 即取

$$\sigma_{th} = \begin{cases} \sigma_{fix} & \text{当 } \sigma_{fix} \geq \sigma_{var} \\ \sigma_{var} & \sigma_{fix} < \sigma_{var} \end{cases} \quad (22)$$

式中 σ_{fix} 即式 (19) 或 (20) 方法计算的固定阈值。

在此情况下, 影象噪声及低信噪比的弱特征均被抑制, 而相对突出了强边缘特征。

图 9 所示为影象信号预处理的一个实例。其中图 a 是一对核线上的影象信号, 图 b 是经过 [1 1 1] y 向平滑、[1 1 1 1 1 1 1 - 2 - 2 - 2 - 2 - 2 - 2 - 2 - 2 1 1 1 1 1]

$[1\ 1\ 1]x$ 向滤波及浮动阈值处理后的结果。图c是经过 $[1\ 1\ 1]y$ 向平滑、 $[-1\ -1\ -1\ -1\ -1\ -1\ -1\ -1\ -1\ -1\ -1\ -1\ -1\ -1\ -1\ -1]$ $[1\ 1]x$ 向滤波及浮动阈值处理后的结果。显然经过这些处理后信号的突变部分得到了增强，相似性有所改善。

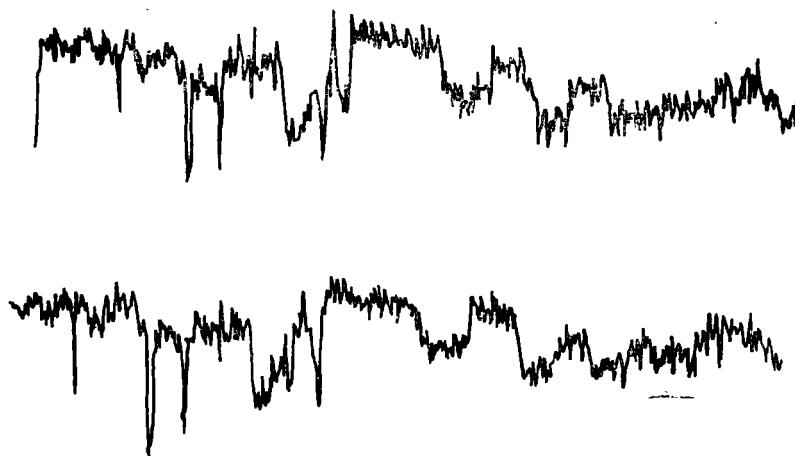


图 9 a

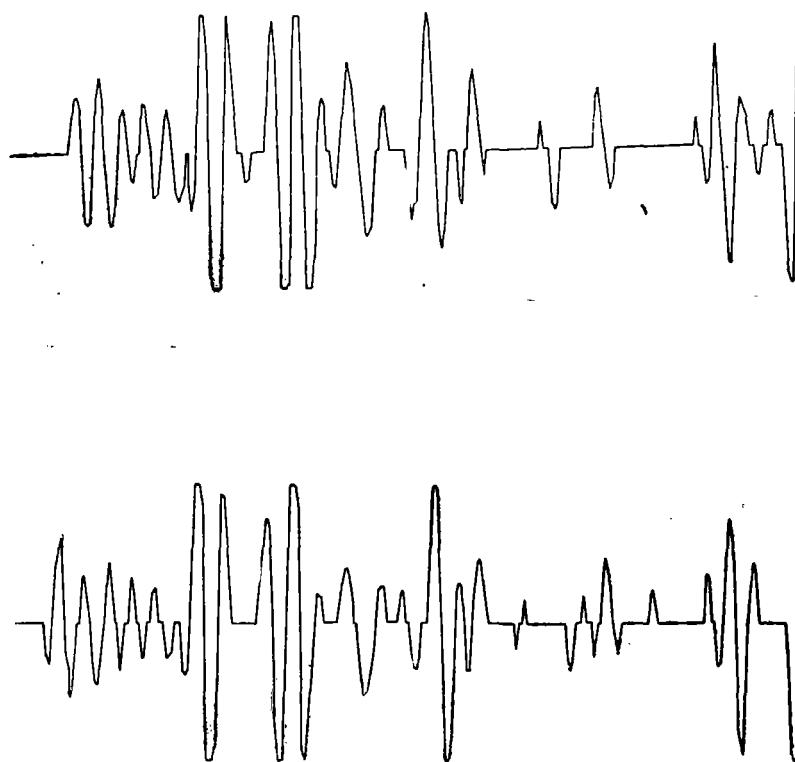


图 9 b

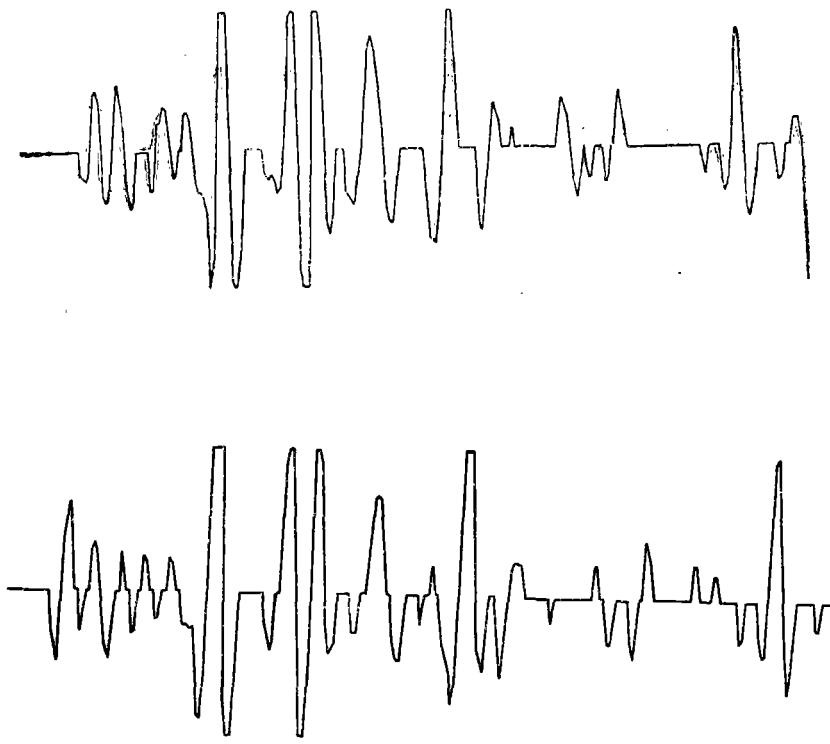


图 9 c

图 9 影象信号预处理

四 匹配算法

紧接着影象预处理的步骤是影象匹配，其目的在于从左右影象中寻求同名点。为避免计算互相关系数的繁重工作量，文献 4 曾提出两种量度左右信号相似性的方案：（I）计算协方差；（II）计算同极性元素对的个数。前者准确度较好，但需要的计算时间仍然较多，后者计算迅速，但准确度较差。本试验采用了一种带阈值的绝对差值总和作为左右影象相似性的量度。该方法的计算速度接近前面的方法 II，而准确度则与方法 I 相当。

设从左片取目标区 S' (I)，从右片取搜索区 S'' ($I+K$)，其中 K 为搜索区相对于目标区的移位值（见图10），则每对应象元的信号差之绝对值可表示为：

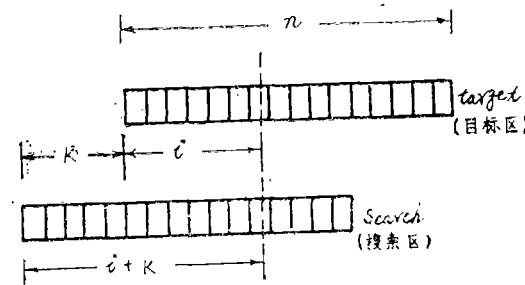


图10 目标区与搜索区

$$Q(I) = \begin{cases} \sigma_{th} & \text{若 } S'(I) = 0 \\ & \text{且 } S''(I+K) = 0 \\ |S'(I) - S''(I+K)| & \text{若 } S'(I) \neq 0 \\ & \text{或 } S''(I+K) \neq 0 \end{cases} \quad (23)$$

对于整个目标区，其差异系数可表示为

$$C = \frac{1}{n\sigma_{th}} \sum_{I=1}^n Q(I) \quad (24)$$

式中 n 为目标区所包含的象元数。

显然，当 $S'(I)$ 与 $S''(I+K)$ 完全相同时， $C = 0$ 即全相关。若对于整个目标区 $I = 1 \sim n$ ，所有的 $S'(I) = S''(I+K) = 0$ ，这意味着该范围内的信号被噪声所淹没，这时谈不上任何相关，因此 $C = 1$ ，而 $C > 1$ 也意味着左右信号丝毫不相关。如果需要计算相似程度，可取

$$\omega = 1 - C \quad (25)$$

则当 $\omega = 1$ 时为全相关， $\omega \leq 0$ 为不相关。

五 视差信号处理

无论如何改善相关算法，相关结果中少数点的粗差总难避免。

图 11a 为一条核线最粗一级相关结果的视差剖面，图中 I、II、III 处按比例尺推算相当于地面上有宽 2 米，高 16 米的突起，而实际地形在这些地方是光滑的。引起这些粗差的原因仍是因为左右影象灰度变化在这些点上有较大差异。如果这些粗差不及时加以剔除，次一级的精细相关将会丢失（因为粗差的数值超过了下一级的搜索范围）。

视差信号处理的基本依据在于地形起伏的空间连续性，一般情况下地形变化的空间频率总是显著地低于影象信号的变化频率；若影象信号的变化频率低于地形变化频率，则地形起伏无法用相关办法解决。对于断层、陡坎等特殊地形应借助附加信息处理。基于这个观点，我们可以利用多余相关匹配点的视差值来检测粗差。例如，按地形类别从几何精度方面来推算，要

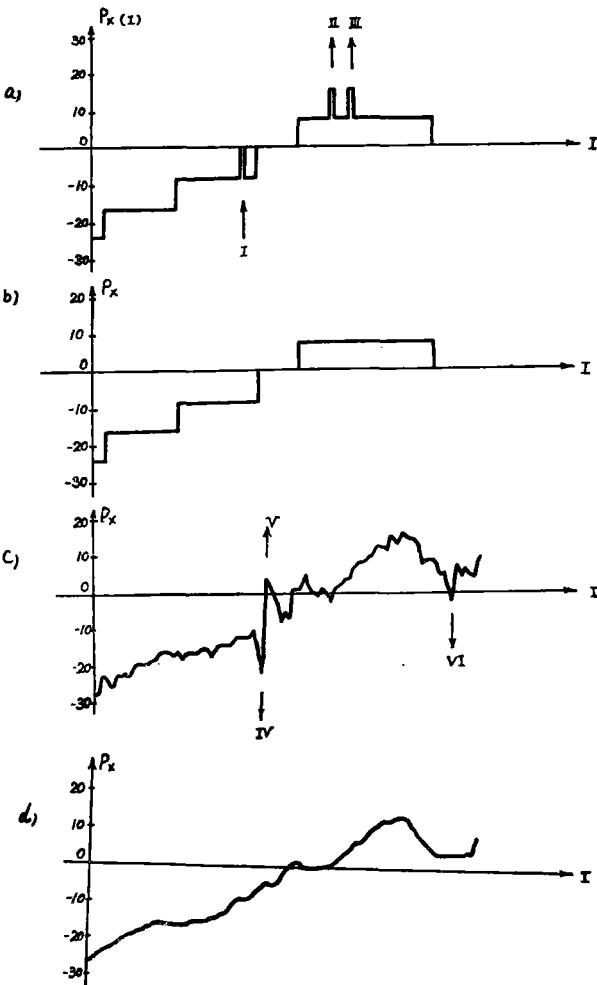


图11 视差信号处理

求数字地面模型(DTM)的格网间隔为0.5mm。为了取得多余值作为粗差检测, 我们可取相关匹配点间隔为0.2mm。本试验采用了下列几种简单的粗差剔除办法。

(1) 失配点视差值内插

按式(24), 若系数 $C \geq 1$, 我们就认为该点失配, 其视差值 P 便由最邻近的两个正确点内插。

(2) 二阶差分判决

对于沿核线的一维视差信号 $P(I)$, 可设置一个二阶差分阈值作粗差判决, 即

$$\text{当 } |P(I) - 2 \cdot P(I-1) + P(I-2)| < P_{th}$$

$$\text{且 } |P(I) - 2 \cdot P(I+1) + P(I+2)| < P_{th}$$

时, $P(I)$ 保持原值; 否则 $P(I)$ 值由最邻近两点内插(见图12)。

上面的视差阈值 P_{th} 可按地形类别及匹配点间隔来确定。如图13的情况, 若认为左片上象点 c' 为 $a'b'$ 之中点, 则图中的 c'' 便不可能是 c' 的同名象点。 c' 的可见的同名象点必须在 $a''b''$ 之间。根据大多数可能的情况(在这里不需要完全准确), 可设阈值

$$\frac{P_{th}}{2} = \left| P_c - \frac{P_A + P_B}{2} \right| < \frac{a'b'}{2} \quad (26)$$

$$\text{或 } P_{th} = 2 \cdot \left| P_c - \frac{P_A + P_B}{2} \right| < a'b' = D_m \quad (27)$$

式中 D_m 是匹配点间隔。

图11b是11a的情况通过二阶差分判决剔除粗差后的结果。这种阶梯式视差断面是粗级相关的正确结果。

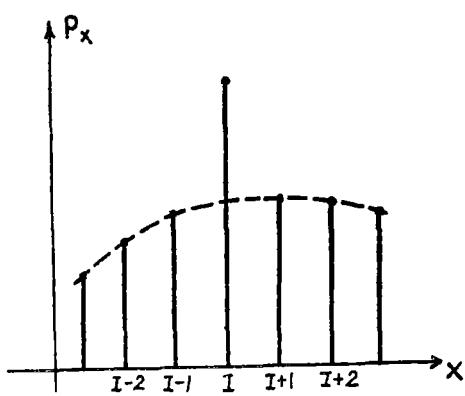


图12 视差的粗差

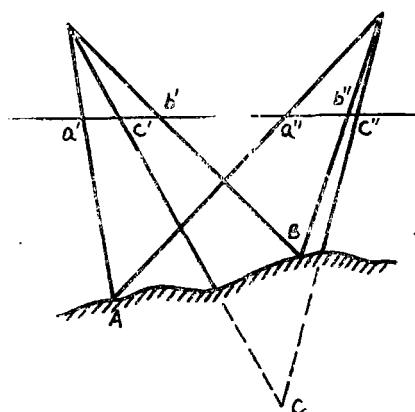


图13 二阶差分判决的阈值

(3) 二维局部协调

图14所示为DTM格网情况，考虑到地形起伏在点I周围的局部协调，我们认为点I的高程(视差)不应当太悬殊地超过其周围8个点的平均值。类同于前面一维信号二阶差分判决的情况，我们可取一个先验的阈值作下列判决

$$P(I, J) = \begin{cases} P(I, J) & \text{当 } |P(I, J) - \frac{1}{8}M * P(I, J)| < P_{th} \\ \frac{1}{8}M * P(I, J) & |P(I, J) - \frac{1}{8}M * P(I, J)| \geq P_{th} \end{cases} \quad (28)$$

式中，*表示卷积运算。M是卷积算子，可取为

$$M = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix} \quad (29)$$

或其它考虑到点间分配权的形式。

(4) 平滑

由于所取的匹配点密度高于要求的DTM格网密度，因此有可能对视差信号再作一次平滑处理，以缩减剩余的误差。平滑算子的选择取决于匹配点间隔相对于DTM格网间隔的比值。一般较为方便的形式是[1 1 1]，[1 2 1]或[1 1 1 1 1]。图11c所示的视差断面是经过前述的(1)和(2)两项处理，但未经(3)和(4)项处理，这时由于误差的累积，在最细层的相关结果中仍然出现有粗差(图c中的IV、V点处)。逐层施加平滑处理后，最终结果显著改善，图11d的断面与实际地貌十分接近。

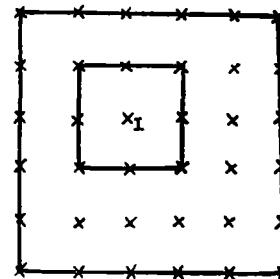


图14 二维局部协调

六 目 标 区 大 小

确定目标区的大小是相关中的一个关键问题。以下两个方面必须同时加以考虑。

(1) 获取足够的信息量

采用足够大的目标区以提供足够的影象信息，这是获得可靠相关结果的重要保证。如果目标区选得太小，所能提供的信息量不足，即便象片质量再好也难保证有良好的相关结果。

在一维长度受到限制的情况下，可采用二维目标区来获取更多的信息(这时相关搜索仍然沿一维进行)。但是如前所述，y向的影象高频成分对于x视差检测是无益的，因此在二维目标区内象元的分布不应当是x和y方向等间隔的，y方向的间隔可显著地大于x方向(见图15)。

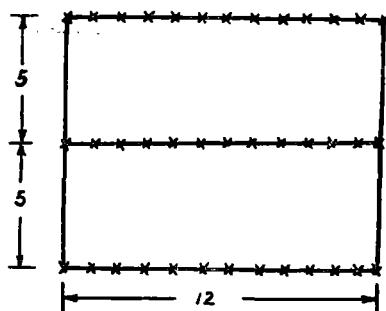


图15 二维目标区内的象元分布

(2) 保证足够的几何精度

对于地形起伏较大的地区，选择的目标区越大，相关结果的精度越差。图16所示为地面上点M和N，在左右象片上分别成象 m' 、 n' 及 m'' 、 n'' 。由于地形起伏 $m' n' \neq m'' n''$ 。现在取左片上的 $0 \sim a$ 段核线作为目标区， n' 点位于目标区的中心附近，但是由于M点处的信号强度远超过N点，相关被M信号所强夺，因此真正的配准点是 $m' - m''$ ，而不是 $n' - n''$ 。在N点处存在配准误差

$$e = m' n' - m'' n'' = \frac{fBh}{H^2} = \frac{fBR \cdot \operatorname{tg}\alpha}{H^2} = \frac{B}{H} \cdot \gamma \cdot \operatorname{tg}\alpha = \frac{b}{f} \cdot \gamma \cdot \operatorname{tg}\alpha \quad (30)$$

式中， H 为摄影航高， f 为象片主距， B 为摄影基线， b 为象片基线， α 为地面倾角， $\gamma = m' n'$ 。

显然，当 $\gamma = \frac{a}{2}$ 时，配准误差达最大值

$$e_{\max} = \frac{b}{f} \cdot \frac{a}{2} \cdot \operatorname{tg}\alpha \quad (31)$$

若由测图精度要求左右视差的限差为 Δ_p ，则必须

$$e_{\max} \leq \Delta_p \quad (32)$$

或

$$a_{\max} \leq \frac{2 \cdot f \cdot \Delta_p}{b \cdot \operatorname{tg}\alpha} \quad (33)$$

这是从几何精度方面推算所允许的最大目标区尺寸。在此条件下左右影象信号可直接用于相关计算而不必根据地形坡度进行调制 (Modulation) 或重取样 (Resampling)。本例情况， $f = 153\text{mm}$ ， $b = 85\text{mm}$ ， $\Delta_p = 0.04\text{mm}$ ， $\operatorname{tg}\alpha_{\max} = \frac{1}{4}$ ，因此

$$a_{\max} \leq \frac{2 \times 153 \times 0.04}{85 \times \frac{1}{4}} = 0.6\text{mm} \quad (34)$$

因最精细层相关取用的象元尺寸为 $50\mu\text{m}$ ，故按象元数目计算的目标区尺寸为

$$a'_{\max} = \frac{0.6}{0.05} = 12\text{象元} \quad (35)$$

这就是说，在本试验资料情况下，不进行地形调制或重取样的最佳目标区尺寸为12个象元数。

上面讨论的是一维目标区的情况。对于二维目标区必须考虑 y 向地形坡度的影响，因此目标区的 y 向尺寸也应当受到限制。由 y 向地形坡度引起的 x 视差配准误差仍然可用式(31)计算，只是这时式中的 α 表示 y 向地形坡度角。

兼顾上述的信息量与几何精度两个方面的要求，能使得 x 和 y 方向尺寸最小而又能获

得最多影象信息的目标区形状显然是正方形(见图15)。在这正方形内、沿核线的象元间隔必须满足几何精度方面的要求,而相邻核线的间隔可以3~5倍于前者。

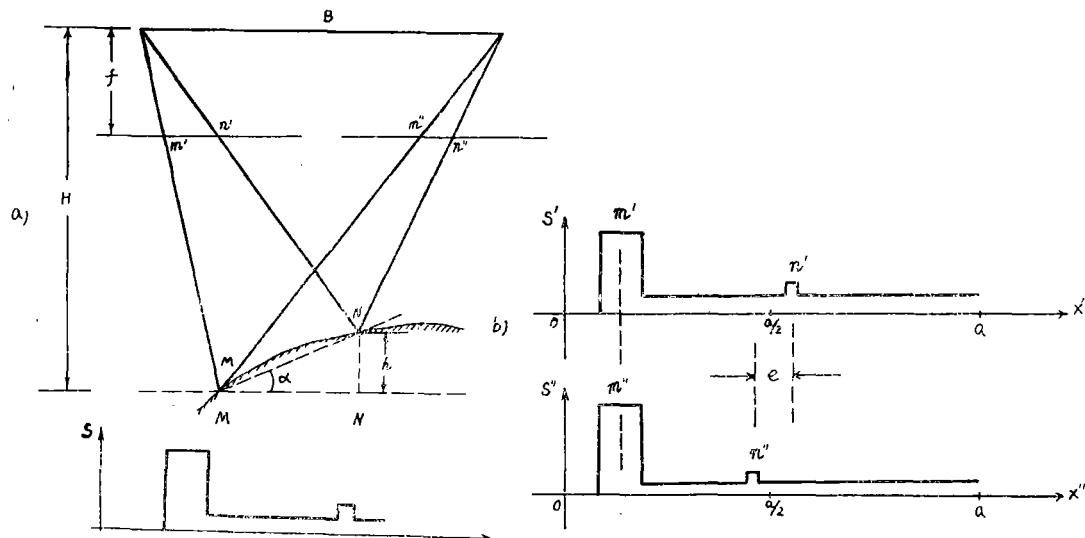


图16 地形坡度引起的配准误差

对于山区地形,若按式(34)所计算的目标区尺寸太小,不足以提供足够的影象信息,则为了保证相关的可靠性,必须采用地形调制或重取样的办法。当然,这需要增加相当大的计算量。

七 结果与精度

本试验各主要环节的基本想法前面已叙述,这些想法已经编成一组 Fortran 程序用于试验。试验数据如表 1 所列。试验结果示如图17和18。图中的数字是核线系统的左右视差。等高线亦按等视差描绘,尚未转换到大地坐标系。整个图的面积为 $2 \times 3 \text{ cm}$, 格网点间隔为 $1 \times 1 \text{ mm}$ 。图17与18的不同之处仅在于影象预处理阶段所使用的滤波器不同;图17系采用含 $[1 -1 1]$ 型的滤波器的结果;图18系采用含 $[-1 3 -3 1]$ 型滤波器的结果。为了检查结果精度,我们从该窗口 $(2 \times 3 \text{ cm})$ 影象中寻找出68个明显地物点,并以人工识别办法确定其左右视差,(其数值列如表 2 的 Test 列)。然后将图17与18的结果与之比较(见表 2 之 Lap 与 Bf 列),按其较差统计各自的均方误差。结果说明两种滤波器的精度相当。其最大误差为

$$e_{\max} = 4 \times 0.025 = 0.10 \text{ mm} \quad (36)$$

其标准差为

$$\sigma = 1.6 \times 0.025 = 0.04 \text{ mm} \quad (37)$$

两种滤波方法的最后结果差异也按图17与18的全部点作出统计,其标准差为

$$\sigma_{L-B} = 0.04 \text{ mm}$$

这种精度作为正射象片生产已经足够,但用于地形测图还稍嫌不足。如何提高相关结果的精度与可靠性而又不过多地增加计算量,这是值得进一步研究的课题。

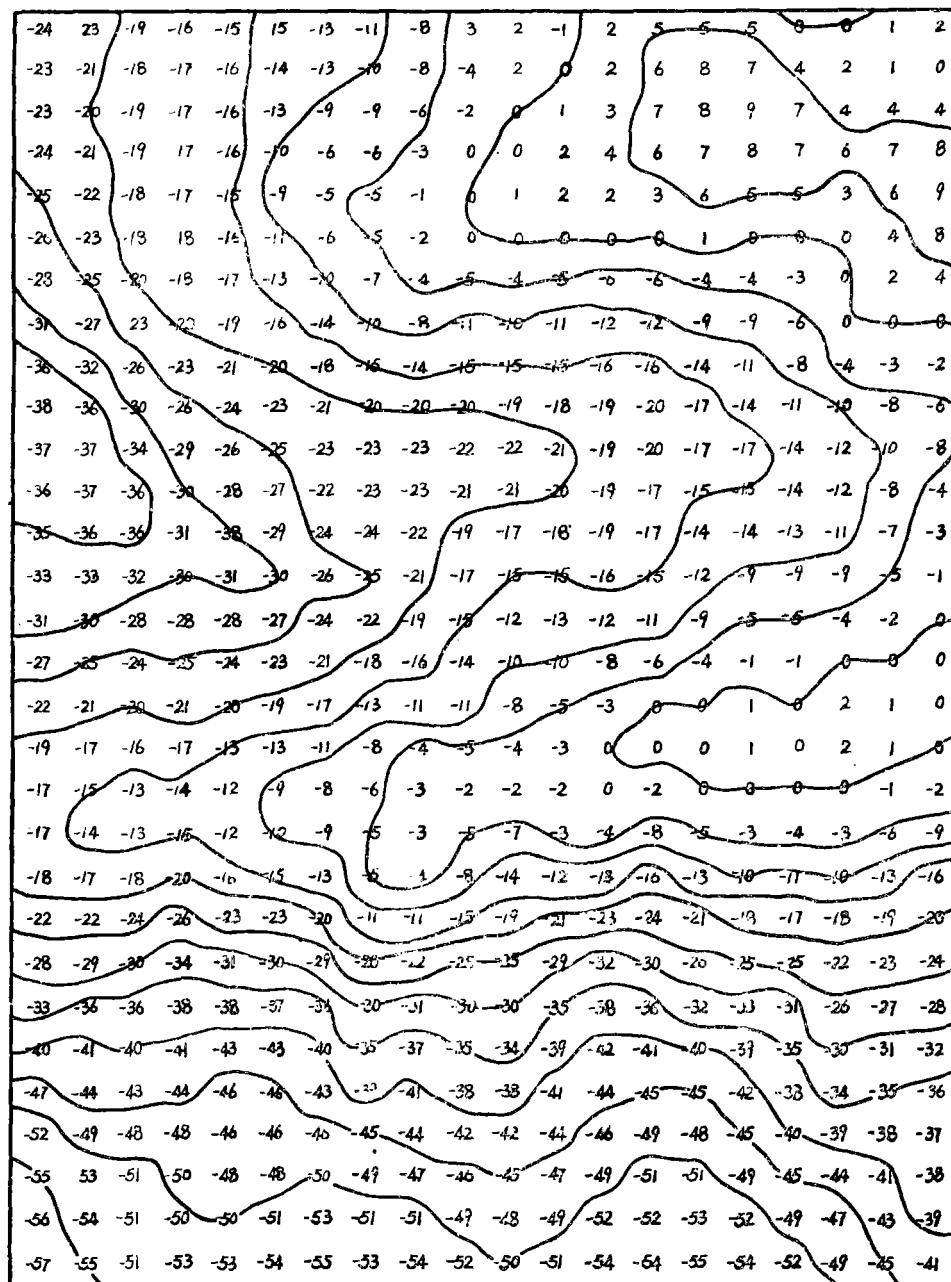


图17 采用含 [1 - 2 1] 型滤波器的相关结果

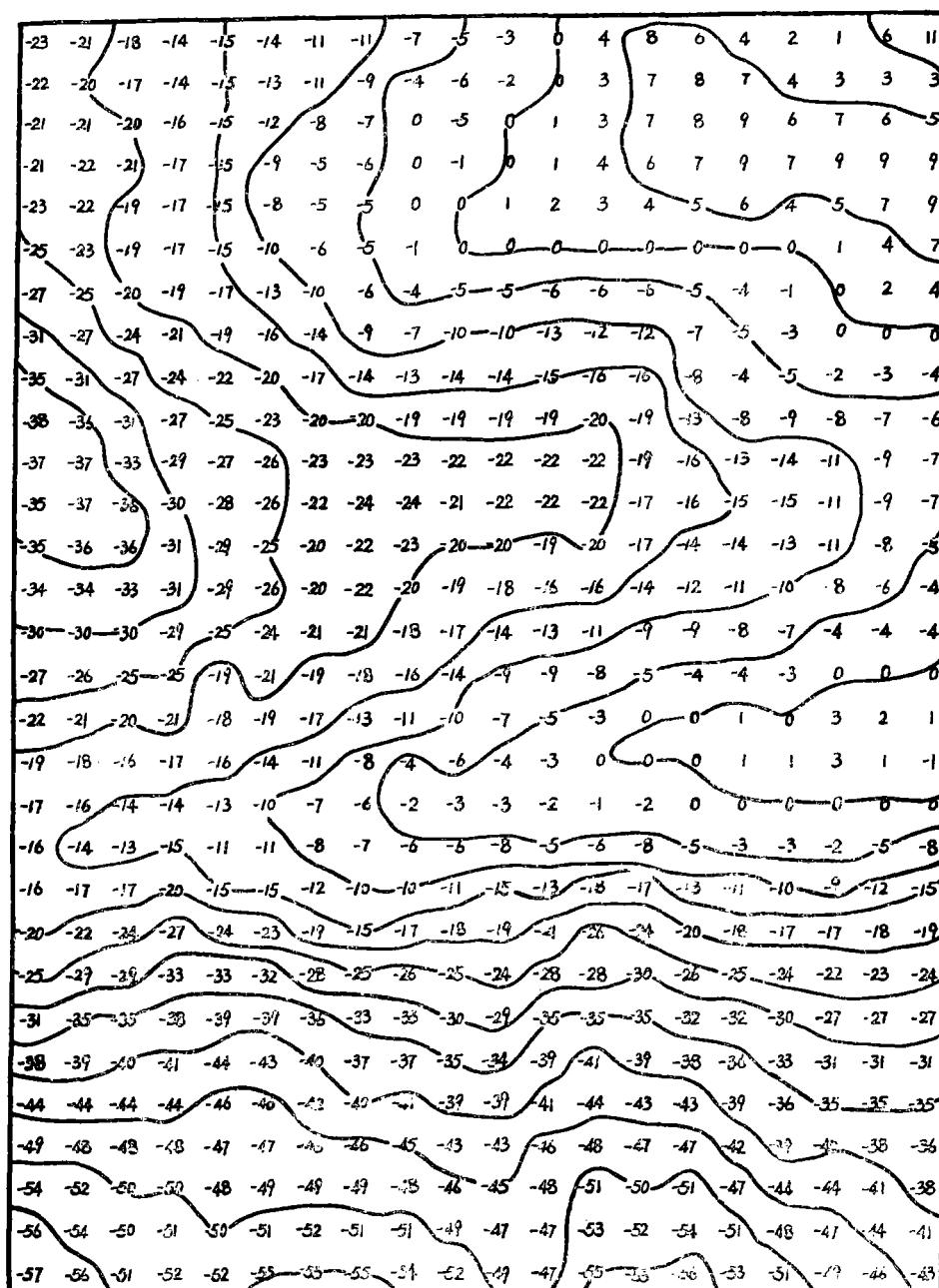


图18 采用含[-1 3 -3 1]型滤波器的相关结果

表2 误 差 统 计

P.N	Test	Lap	Bf	P.N	Test	Lap	Bf	P.N	Test	Lap	Bf
1	-22	-22	-22	31	-18	-16	-18	61	-55	-54	-54
2	-20	-20	-20	32	-22	-20	-22	62	-47	-46	-47
3	-19	-17	-17	33	-18	-19	-22	63	-47	-47	-47
4	-17	-15	-15	34	-16	-15	-14	64	-50	-50	-49
5	-13	-11	-10	35	-13	-10	-12	65	-55	-55	-56
6	0	0	0	26	-15	-15	-15	66	-38	-38	-38
7	4	5	5	37	-15	-13	-14	67	-45	-43	-44
8	0	0	0	38	-9	-9	-9	68	-48	-45	-46
9	8	4	6	39	-8	-5	-7				
10	5	5	6	40	-3	-3	-3	\bar{X}		0.93	0.85
11	3	4	5	41	-17	-17	-17	σ_{n-1}		1.59	1.53
12	-28	-28	-27	42	-20	-20	-20	e_{max}		4	4
13	-29	-27	-27	43	-20	-20	-20				
14	-34	-34	-35	44	-13	-13	-13				
15	-28	-24	-24	45	-12	-14	-14				
16	-27	-24	-25	46	-15	-14	-14				
17	-20	-20	-20	47	0	-2	-2				
18	-1	-1	-1	48	-6	-7	-6				
19	-24	-22	-20	49	-11	-8	-10				
20	-17	-19	-18	50	-1	0	0				
21	-6	-8	-6	51	-30	-30	-30				
22	-10	-10	-9	52	-32	-31	-33				
23	-4	0	0	53	-41	-40	-40				
24	-11	-7	-7	54	-35	-13	-33				
25	-35	-35	-35	55	-29	-29	-29				
26	-41	-37	-37	56	-23	-23	-24				
27	-29	-28	-25	57	-32	-32	-31				
28	-30	-30	-27	58	-55	-53	-52				
29	-25	-25	-26	59	-48	-46	-47				
30	-22	-20	-22	60	-49	-46	-48				

P.N——点号

Test——人工识别的视差

Lap——采用含(1-21)
型滤波器的结果Bf——采用含(-13-31)
型滤波器的结果表中视差值的单位是 25 μ m

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum (p - p_t)$$

$$\sigma_{n-1} = \sqrt{\frac{\sum (p - p_t)^2}{n-1}}$$

 $p_t = Test$ $P = Lap \text{ or } Bf$ $e_{max} = maximum \text{ error}$
 $(p - p_t)$

参考文献

- [1] G.Konecny: Development and possibilities of digital image correlation and digital differential rectification . «Photogrammetric Engineering and Remote Sensing» 1981.3.
- [2] T.J.Keating: An improved method of digital image correlation. «Photogrammetric Engineering and Remote Sensing» 1975.8.
- [3] B.Makarovic & K.Tempfli: Digitising images for automatic processing in photogrammetry, «ITC» 1979.1.
- [4] B.Makarovic: Automatic off-line generation of digital terrain models «ITC» 1980.3.
- [5] U.V.Helava: Digital correlation in photogrammetric instruments. «ISP» Helsinki 1976.
- [6] N.J.Mulder: A View on digital image processing, «ITC» 1980.3.

An Experiment in Digital Correlation of Photogrammetric Images

Lin Zongjian

Abstracts

This is a report of an experiment about the epipolar digital image correlation in photogrammetry. The following problems have been described in detail: (1) Image transformation from the scanning system to the epipolar system; (2) Image preprocessing to enhance the features, which are advantageous to correlation; (3) Image matching using the sum of the absolute differences with a threshold; (4) Gross error detection by the convolution algorithm; (5) The analysis of registration error from terrain slope and the best target size.