

# 基于数码摄影技术的岩体裂隙测量方法初探

范留明, 李 宁

(西安理工大学 岩土工程研究所, 陕西 西安 710048)

**摘要:** 基于数码摄影技术的岩体裂隙测量法, 是一种与传统测量完全不同的新方法, 可以高效率地测量岩体裂隙。基于数字图像处理理论, 针对裂隙图像的特点, 对这一新方法进行了比较全面地探索, 提出了裂隙图像的现场采集方法及其解译路线, 重点研究了智能识别方法, 并研发了相应的处理软件。按照上述解译路线, 应用自编裂隙图像处理软件, 对从野外实拍的典型数字裂隙图像进行了试算、分析和总结, 初步证明了此解译路线的可行性。

**关键词:** 岩石力学; 岩体裂隙; 裂隙图像; 图像解译; 智能识别; 形状解析; 数码摄影测量法

**中图分类号:** TU 459<sup>+</sup>.9

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-6915(2005)05-0792-06

## STUDY ON ROCK MASS JOINT MEASUREMENT BASED ON DIGITAL PHOTOGRAMMETRY

FAN Liu-ming, LI Ning

(Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

**Abstract:** Rock mass joints, a typical sort of structural planes, are widely distributed in the rock mass. So the measurement and investigation on rock mass joints are the foundation for rock mass classification and the determination of physical and mechanical parameters. However, the traditional in-situ investigation using manual measuring tools is inefficient and costly. The digital photogrammetry is applied into rock mass joint measurement to overcome these disadvantages in this paper. Based on principles of digital image processing and the characteristics of images of rock mass joints, an interpretation scheme for images of rock mass joints based on digital photogrammetry is put forward, which includes geometrical transform, image enhancement, intelligent recognition and shape analysis. Of these procedures, the intelligent recognition for rock mass joints is discussed in detail. The feasibility of the interpretation scheme is proved in a typical case of digital image processing of rock mass joints.

**Key words:** rock mechanics; rock mass joint; image of rock mass joint; image interpretation; intelligent interpretation; shape analysis; digital photogrammetry

## 1 引言

裂隙在很大程度上决定了岩体的物理力学性质, 因此通过现场调查和测量获取裂隙的几何特征, 是评价岩体质量分级、提取岩体力学参数以

及数值仿真分析与优化工程设计的基础。但是, 传统的野外调查和现场测量尚处于手工测量阶段, 是一项低效、费力、耗时的工作。幸运的是, 数码摄影技术和数字图像处理为实现这一目标提供了强有力的技术支持, 基于数码摄影技术的裂隙测量(简称数码摄影测量)为实现高效的裂隙测

收稿日期: 2003-10-04; 修回日期: 2003-12-06

作者简介: 范留明(1968-), 男, 博士后, 1990年毕业于长安大学应用地球物理系, 现任副教授, 主要从事岩石力学与工程方面的教学和研究工作。  
E-mail: fanliuming@yahoo.com.cn.

量提供了一种可能途径。

数码摄影测量法的核心问题在于如何通过对数字裂隙图像解译, 得到有关裂隙几何展布方面的信息。虽然摄影技术用之于工程现场历史已久, 但是用以测量裂隙则只是近十几年来的事情。20 世纪 90 年代, 日本的研究者基于图像处理技术, 对掌子面的地质条件进行了图像处理, 以提炼与围岩分级有关的参数、预测对掌子面前方的地质情况以及观察衬砌的开裂等等, 其中清水土建公司、东亚计测会于 1993 年开发了隧道掌子面图像处理系统<sup>[1]</sup>。在国内, 文[2]对井下钻孔摄像仪的软硬件进行了系统设计, 不仅可以再现深部地质构造图像的播放功能, 而且能够利用摄像数据确定结构面的产状和裂隙宽度, 实现了从“看”到“算”的转化; 文[3]对数码摄像机采集的裂隙数据进行了解译, 基于光学成像原理确定了图像数据与实际裂隙之间的对应关系, 并对图像裂隙进行了整理和统计。

上述大部分研究工作只是其中的一个片段, 较系统的研究成果尚未见报道。但总体而言, 数码摄影测量法包括现场测量和图像解译两部分, 其中图像解译是关键, 实现其智能化解译尤为困难。作者基于图像观点, 结合裂隙发育特征, 紧紧抓住如何解译岩体裂隙图像这一关键问题, 对这一新的测量方法进行了全面地探索, 提出了“几何变换 图像增强 智能识别 形状解析”解译路线, 重点在裂隙的智能识别方面进行了较细致的研究, 以期推动岩体裂隙调查测量方法的应用和发展。

## 2 现场测量

传统的测量方法主要有测线法和测网法 2 种。测线法是沿着布设的测线方向上逐条搜索与测线交切裂隙, 测量每一条符合条件的裂隙, 并记录其相关工程性状。测网法与测线法并没有本质区别, 所不同的是测网法以网格为单位测量裂隙, 测量精度决定于网格密度, 高密度测网具有较高的测量精度, 但是也需要投入更多的测量工作。

数码摄影测量完全不同于传统的测量方法, 它只需要在某一裂隙露头地带连续摄像即可。为了便于判别和分析裂隙, 在拍摄时候, 尽量保持

光线均匀以及镜头主轴方向与裂隙露头面垂直, 以确保所摄图像为正视图像。

## 3 图像解译

### 3.1 几何变换

图像的几何变换的目的是确定图像与实物的尺度比例。在较小的摄影范围, 可以忽略因岩体露头的不规则性造成的几何畸变。对于正视图像, 根据透镜成像原理, 图像与实物存在如下比例关系:

$$\left. \begin{aligned} x &= -a(X - X_0) \\ y &= -a(Y - Y_0) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: 负号表示图像与实物之间的倒影关系;  $X$  和  $Y$  为实物的空间坐标;  $X_0$  和  $Y_0$  为摄影中心坐标;  $a$  为透镜焦距以及物距有关的比例系数, 为常数。

### 3.2 图像增强

图像增强属于图像处理的一部分, 旨在改善图像质量, 提高信噪比, 是图像解译的基础。图像增强的方法有很多, 其中边缘检测最适于对裂纹(裂隙)图像增强处理。在各种边缘检测方法中, 模板匹配法具有平滑噪声的特点, 通常能得到较好的增强效果, 所以适于处理裂隙图像。

模板匹配法是一种各向异性的边缘检测方法, 可以扩展为多个方向的模板, 每一个模板均为一个  $N \times N$  矩阵。图 1 是  $3 \times 3$  矩阵形式的普雷外特模板<sup>[4]</sup>, 构成 8 个方向模板  $m_1 \sim m_8$ , 箭头指示方向为方向模板  $m_p$  的匹配方向, 其匹配算法表达式为

$$f_p(i, j) = \sum_{k=1}^3 \sum_{l=1}^3 g_{i+k-2, j+l-2} c_{k, l}(m_p) \quad (2)$$

式中:  $f$  为输出值;  $g$  为图像值;  $c$  为模板  $m_p$  的系数;  $p$  为模板序号,  $p=1, 2, \dots, 8$ 。

### 3.3 智能识别

数码摄影测量法对工作效率的提高, 不仅表现在现场测量方面, 而且还表现在裂隙统计方面。显然, 实现对裂隙的自动判读替代人工判读, 是提高统计效率的关键问题。为此, 作者基于模式识别原理, 对裂隙图像的智能识别进行了初步研究。研究表明, 裂隙图像的智能识别可以分为图像分割、特征选择以及分类判别 3 个阶段。

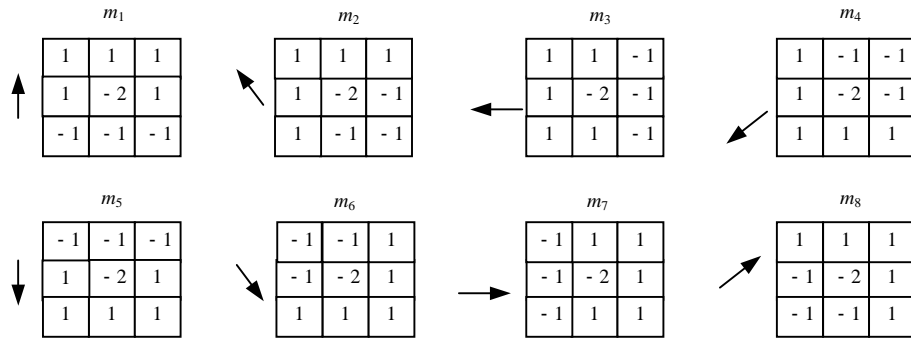


图 1 Prewitt 模板<sup>[4]</sup>  
Fig.1 Prewitt pattern<sup>[4]</sup>

3.3.1 图像分割

图像分割是将数字图像分割成互不相交(不重叠)的区域,目的是把识别对象及其背景区别开来。对于裂隙图像而言,所识别对象就是裂隙,图像分割的任务就是要将裂隙从复杂的背景中分离出来。阈值变换方法是最常见的一种图像分割方法,其变换表达式为

$$f(x) = \begin{cases} 1 & g(x, y) \geq \xi \\ 0 & g(x, y) < \xi \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $f()$  为阈值变换输出值,  $g()$  为图像值。式(3)的意义是:根据某一阈值  $\xi$  将图像分成小于  $\xi$  和大于  $\xi$  两部分像素集,分别对应两种颜色,这一处理方法也称为图像的二值化(binanzation),通过二值化处理,灰度图像转换成双色图像(通常为黑白图像)。

3.3.2 特征选择

特征选择是在特征群中找出能够识别对象且不影响其位置的一组特征,并且尽量使这组特征的数目最少。由于裂隙是一种近线形构造,所以可将裂隙抽象为一直线段,实质上这是对裂隙几何形状的一级近似,故称之为线性裂隙模型。

表征线性裂隙模型至少需要 2 个参数,即斜率  $k$  和截距  $b$ 。但是,当直线与  $x$  轴垂直时,斜率  $k$  和截距  $b$  将变成  $\infty$ ,所以直接选择  $k, b$  作为特征参数,不利于数值计算。为此,选择极坐标参数  $\rho, \theta$  表征直线,参数  $\rho, \theta$  通过 Hough 变换<sup>[5]</sup>获得

$$\rho = x \cos \theta + y \sin \theta \quad (4)$$

式中:  $(\rho, \theta)$  表示原点到直线  $y = kx + b$  的垂直向量(见图 2(a)<sup>[6]</sup>),  $\rho$  为距离,  $\theta$  为方位角。

式(4)表明,  $x, y$  平面上任意一条直线的 Hough 变换都是  $\rho - \theta$  平面上的一个点(也称 Hough 点),而  $x, y$  平面上任意一个点,则对应于  $\rho - \theta$  平面的一条正弦型曲线。如果  $x - y$  平面上一组点  $(x_i, y_i) (i = 1, 2, \dots, n)$  位于同一条直线上(见图 2(b)<sup>[6]</sup>),则对应  $\rho - \theta$  平面上的曲线共交于同一点(见图 2(c)<sup>[6]</sup>)。

为了找出这些点构成的直线段,将  $\rho - \theta$  平面划分成许多小格子,每个格子对应于计数器  $Hf(\rho_j, \theta_j) (j = 1, 2, \dots, m)$ ,用来统计由参数  $(\rho_j, \theta_j)$  决定(满足式(4))的共线点  $(x_i, y_i)$  的个数。如果计数器  $Hf(\rho_j, \theta_j)$  具有局部极大值,那么它所对应的  $(\rho_j, \theta_j)$  对应了  $x - y$  平面上一条实际存在的直线段。

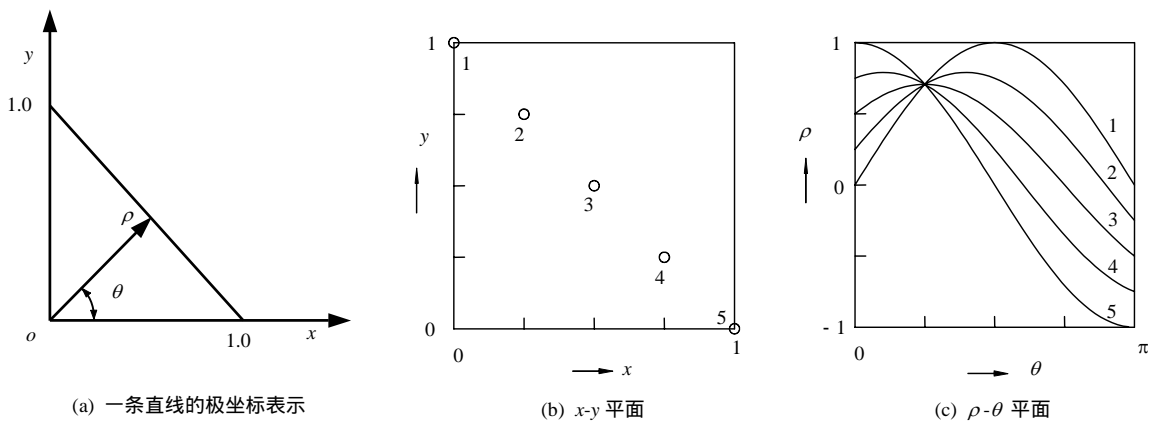


图 2 Hough 变换<sup>[6]</sup>  
Fig.2 Hough transform<sup>[6]</sup>

通过 Hough 变换, 将  $x-y$  平面上的一条直线段映射成  $\rho-\theta$  平面上的一个点。因为参数  $\rho, \theta$  唯一地决定了一条直线, 并且能够通过计数器  $Hf$  检测出直线的存在, 所以选择  $\rho, \theta$  作为识别裂隙的特征参数是合适的。

### 3.3.3 分类判别

分类判别是裂隙识别过程中的最后一个阶段, 其任务是在  $\rho-\theta$  平面上找出图像中裂隙所对应的  $(\rho_j, \theta_j)$ , 或者说判断  $\rho-\theta$  平面上哪些点代表裂隙, 哪些点不代表裂隙。由于  $x-y$  平面上每一条直线段与计数器  $Hf(\rho_j, \theta_j)$  的局部极大点相对应, 所以裂隙判别问题就转化为求局部极大值的问题, 算法如下:

(1) 排序。将  $(\rho_j, \theta_j)(j=1, 2, \dots, m)$  按照计数器  $Hf$  从大到小进行的排序, 使得:

$$Hf(\rho_1, \theta_1) \quad Hf(\rho_2, \theta_2) \quad \dots \quad Hf(\rho_m, \theta_m) \quad (5)$$

(2) 识别首裂隙。选择阈值  $Hf_\xi$ , 如果  $Hf(\rho_1, \theta_1) > Hf_\xi$ , 则  $(\rho_1, \theta_1)$  就是识别出来的第 1 条裂隙, 也是裂隙图像中的一条最长裂隙, 记作  $J_1(\rho_0^1, \theta_0^1)$ , 而且  $\rho_0^1 = \rho_1, \theta_0^1 = \theta_1$ ; 否则, 所识别图像中没有裂隙。

(3) 判别下一个 Hough 点  $(\rho_2, \theta_2)$ 。如果  $Hf(\rho_j, \theta_j) > Hf_\xi$ , 则停止分类; 否则, 判断  $(\rho_2, \theta_2)$  是否属于  $J_1(\rho_0^1, \theta_0^1)$ , 判别依据为欧几里德距离:

$$d_1 = \sqrt{(\rho_2 - \rho_1)^2 + (\theta_2 - \theta_1)^2} \quad (6)$$

对于最小距离  $d_{\min}$ , 如果  $d_1 < d_{\min}$ , 则  $(\rho_2, \theta_2)$  属于裂隙  $J_1(\rho_0^1, \theta_0^1)$ ; 反之, 则为新裂隙  $J_2(\rho_0^2, \theta_0^2)$ , 且  $\rho_0^2 = \rho_2, \theta_0^2 = \theta_2$ 。

(4) 判别第  $j$  个 Hough 点  $(\rho_j, \theta_j)$ 。如果  $Hf(\rho_j, \theta_j) > Hf_\xi$ , 则停止分类; 否则, 假如已经识别出来  $k$  裂隙  $J_1(\rho_0^1, \theta_0^1), J_2(\rho_0^2, \theta_0^2), \dots, J_k(\rho_0^k, \theta_0^k)$ , 则分别计算  $(\rho_j, \theta_j)$  与  $J_1(\rho_0^1, \theta_0^1), J_2(\rho_0^2, \theta_0^2), \dots, J_k(\rho_0^k, \theta_0^k)$  之间的距离:

$$d_s = \sqrt{(\rho_j - \rho_0^s)^2 + (\theta_j - \theta_0^s)^2} \quad (s=1, 2, \dots, k) \quad (7)$$

对于最小距离  $d_{\min}$ , 如果  $d_s < d_{\min}$ , 则  $(\rho_j, \theta_j)$  属于第  $s(s < k)$  条裂隙; 如果对于任意  $s(s=1, 2, \dots, k)$ , 都有  $d_s > d_{\min}$ , 则  $(\rho_j, \theta_j)$  为第  $k+1$  条裂隙  $J_{k+1}(\rho_0^{k+1}, \theta_0^{k+1})$ , 且  $\rho_0^{k+1} = \rho_j, \theta_0^{k+1} = \theta_j$ 。

(5) 重复(4), 直到对于  $\rho-\theta$  平面内所有 Hough  $(\rho_j, \theta_j)(j=1, 2, \dots, m), Hf(\rho_j, \theta_j) > Hf_\xi$  为止。

### 3.4 形状解析

虽然裂隙识别可以判断裂隙是否存在, 并能够确定其大致的产状(视倾角表示)和位置, 但是却不能够得到裂隙粗糙度、张开度、延续度以及复杂的交切关系等几何参数。为了更精细地描述裂隙的几何特征, 需要通过对裂隙边缘或轮廓的追踪量化其几何形状。目前, 对裂隙形状的智能解析依然是一个难题, 其主要困难在于灰度图像的复杂性, 例如裂隙及其充填物颜色变化, 周围岩石颜色差异, 光照不均以及其他诸多因素干扰。因此, 对裂隙边缘或轮廓的追踪, 在很大程度上仍然依赖于人的视觉, 所以基于交互处理的裂隙拾取技术是解决此类问题的一种可行途径。交互裂隙解析的基本思想是, 在图像显示区设置一个定位光标(通常为十字形), 通过移动此光标确定裂隙的位置, 然后采用逐行(或列)扫描方式记录裂隙。基于上述思想, 自编了 Projoint 专门处理软件, 开发了交互式解析功能, 具体步骤如下:

(1) 打开裂隙图像, 将鼠标移至图像显示区(如图 3 所示), 此时鼠标将变成十字形, 光标在状态栏显示光标位置。

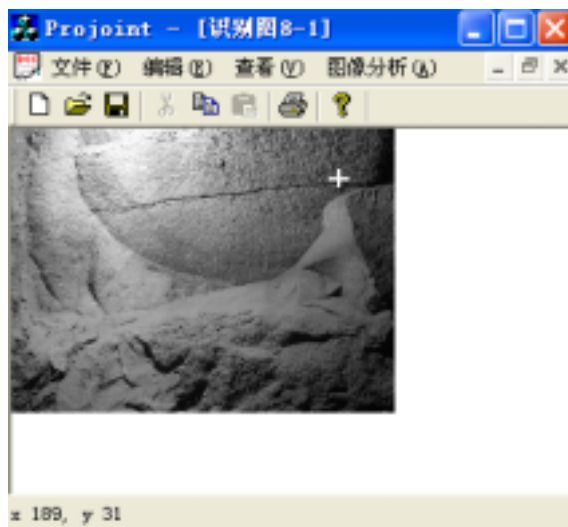


图 3 导流平洞裂隙图像  
Fig.3 Digital joint image of an adit

(2) 选定裂隙, 将十字形光标移至该裂隙一侧始点位置。

(3) 通过 “←”, “→”, “↑”, “↓” 等按键对光标精确定位, 并用 “Tab” 或 “Enter” 键记录十字交点处位置(像素单位)。

(4) 重复(3), 对裂隙进行逐行或列定位, 并记录其位置。

(5) 追索完成后, 按 “S” 进行存盘, 存储为文

件形式。

(6) 重复(3)~(5)，对裂隙另一侧进行定位。

### 4 工程实例

#### 4.1 图像采集

图 3 是一幅在某导流平洞中拍摄的裂隙图像，所用设备为日本生产的 Nikon E995 数码照相机。洞内围岩以中、细粒砂岩为主，岩体质量总体较差，除断层外，多属、类围岩。因施工采用爆破方式掘进，爆破后快速喷锚，加之洞中光线较暗(洞内有少量瓦斯，禁用闪光灯)，给拍摄带来很大限制，尽管如此，较传统测量法而言，不仅采集效率高，而且实时性强。

在拍摄过程中，保持镜头方向与岩体表面垂直。原始图像为 JPEG 格式、1 024×768 分辨率、24 位真彩色图像。为了方便处理，加之篇幅所限，将原始图像压缩为 128×96 BMP 灰度格式。图 3 中，光照极不均匀，背景亮度变化很大。在图像上方，有一条近水平向闭合裂隙，呈现为低灰度暗色，裂隙轮廓明显，但背景干扰也很大，给图像解译造成很大困难。

#### 4.2 图像解译

按照上述识别方法，自编了相应的处理程序，对图 3 进行了解译。由于尚未获得 Nikon E995 相机镜头焦距参数，所以没有对图 3 做几何变换。

图 4 是对图 3 进行边缘检测增强处理后的图像，选择 Prewitt 模板( $m_3$  或  $m_7$ )匹配法。由图 4 可见，不仅图像上部缓裂清晰，还压制了其他无关干扰，基本上消除了光照不均匀性的影响。

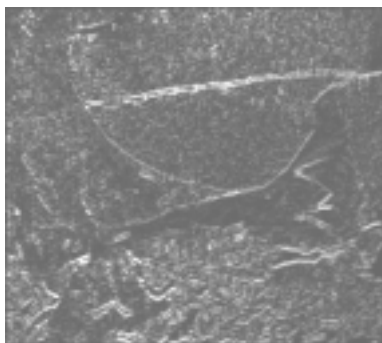


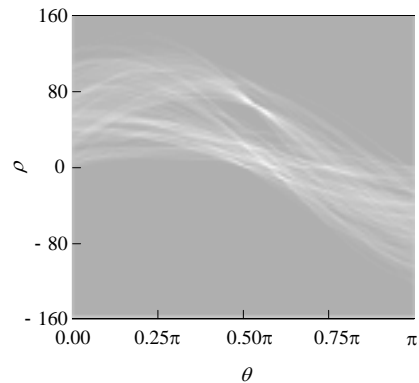
图 4 边缘检测  
Fig.4 Edge detection

在智能识别阶段，首先利用阈值分割将裂隙从背景中分离出来(见图 5(a))。为了能够精确地确定出

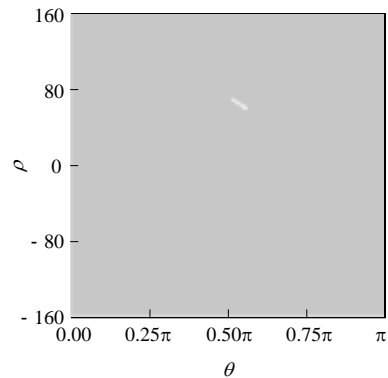
裂隙几何位置，接下来对图 5(a)进行了 Hough 变换处理，在处理过程中，只对白色像素做累计运算，并将处理结果转换为图像格式(见图 5(b))。图 5(b)为 Hough 变换  $\rho$ - $\theta$  平面图，图中横方向为弧度  $\theta$ ，取值范围为  $0 \sim \pi$ ；纵方向为像素数  $\rho$ ，取值范围为  $-160 \sim 160$ ；原点位于图像左下角。通过 Hough 变换，将线性裂隙处理为高灰度点状物。最后，按照上述分类处理流程，识别出了  $\rho$ - $\theta$  平面上能代表裂隙的 Hough 点(详见图 5(c))。因计算误差所致， $\rho$ - $\theta$  平面的点并不是几何点，而是几何区，取几何中心点(68,  $0.6\pi$ )为裂隙位置。



(a) 阈值分割



(b) Hough 变换



(c) 分类

图 5 裂隙识别成果图

Fig.5 Results for intelligent interpretation of digital joint image

裂隙形状解析需要交互处理完成。对于有张开度的岩体裂隙,则需要对两侧都进行追踪。由于图 3 中裂隙接近闭合,故在处理时,没有考虑其张开度,只沿着裂隙的中间位置进行连续追踪,解析结果详见图 6 所示,据此可确定裂隙的几何形状,为提取裂隙其他几何参数奠定了良好的基础。

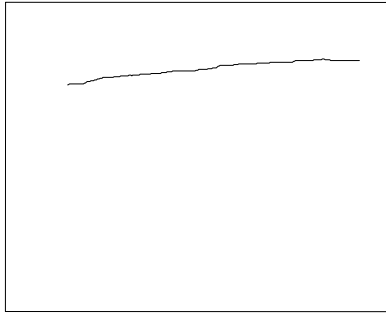


图 6 裂隙几何解析

Fig.6 Geometrical interpretation of digital joint image

## 5 结 语

以数字图像处理为核心技术的数码摄影裂隙测量法,是一种高效率、高精度、低成本的裂隙调查方法,为革新传统的裂隙调查和测量方法提供了一条可能的途径,有广阔的应用前景,而正确、合理、方便快捷地解译裂隙图像依然是其中关键的技术问题。本文对图像解释方法进行了较系统地研究提出了“几何变换 图像增强 智能识别 形状解析”的解译路线,并通过实测图像初步验证了其可行性。但是,数字图像的解译将涉及到岩体结构、图像处理、模式识别、计算机视觉等多个学科领

域,实现智能化解译的难度很大,还需要做很多工作。

## 参考文献(References) :

- [1] 关宝树. 数码相机及图像处理方法在地质判译中的应用[A]. 见:隧道工程施工要点集[C]. 北京:人民交通出版社,2003. 25-32.(Guan Baoshu. The application of digital camera and image processing methods in the geological interpretation[A]. In: Key Point Anthology for Tunnel Engineering[C]. Beijing: China Communications Press, 2003. 25-32.(in Chinese))
- [2] 王川婴,葛修润,白世伟. 数字式全景钻孔摄像系统研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(3): 398-403.(Wang Chuanying, Ge Xiurun, Bai Shiwei. Study on the digital panoramic borehole camera system[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(3): 398-403.(in Chinese))
- [3] 吴志勇. 数码图像的解析在野外岩体裂隙统计上的应用[J]. 成都理工大学学报, 2001, 28(增): 157-161.(Wu Zhiyong. The application of digital image interpretation in the statistics of rock joints in field[J]. Journal of Chengdu University of Technology, 2001, 28(Supp.): 157-161.(in Chinese))
- [4] Prewitt J. Object enhancement and extraction[A]. In: Lipkin B, Rosenfeld A ed. Picture Processing and Psychohistories[C]. New York: Academic Press, 1970.
- [5] Duda R E. Pattern Classification and Scene Analysis[M]. New York: Wiley, 1973.
- [6] (美)Castleman K R. 数字图像处理[M]. 朱志刚译. 北京:电子工业出版社, 2002. 375-394.(Castleman K R. Digital Image Processing[M]. Translated by Zhu Zhigang. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2002. 375-394.(in Chinese))