

文章编号: 1000-7598 (2011) 03-951-07

钻孔成像中结构面自动判读技术研究

吴 剑¹, 冯少孔², 李宏阶³

(1. 中国三峡集团公司, 湖北 宜昌 443001; 2. 中央开发株式会社探查计测部, 东京 169-8612 日本; 3. 三峡大学, 湖北 宜昌 443002)

摘 要: 通过钻孔数字成像系统得到地质钻孔的孔壁数字图像并研判地下地质结构是一种重要的地质勘查手段。对钻孔成像中的结构面信息的判读通常是由人工完成的, 不同的人判读结果可能存在差异。钻孔成像自动辨识结构面系统首先对图像进行 RGB(red 红, green 绿, blue 蓝)到 HSV(hue 色相, saturation 饱和度, value 明度)颜色空间的转换, 使得结构面信息突出显示出来, 以利于图像的结构面提取; 再对转换后的 *S* 分量进行图像滤波及增强等预处理, 然后对图像进行分割, 对分割后的图像进行数学形态学中的二值图像边缘提取和细化处理, 快速分离出结构面信息, 对结构面边缘进行有效的提取; 最后采用正弦曲线的 Hough 变换对图像边缘点进行识别, 可得到钻孔结构面的产状和厚度参数。以实际钻孔数字图像为例, 经过钻孔成像自动辨识结构面系统提取了其中的 4 个结构面的空间参数, 与人工判读结果比较, 自动辨识得到的参数更精确, 结果具有唯一性。

关 键 词: 钻孔成像; 结构面判读; 图像处理; Hough 变换

中图分类号: P642.22

文献标识码: A

Study of automatically extracting structural plane parameters from borehole images

WU Jian¹, FENG Shao-kong², LI Hong-jie³

(1. China Three Gorges Corporation, Yichang, Hubei 443001, China; 2. Geophysical Survey and Logging, Chuo Kaihatsu Corp, Tokyo 169-8612, Japan; 3. China Three Gorges University, Yichang, Hubei 443001, China)

Abstract: Collecting the digital images of geological drilling holes and interpreting the underground geological structure is a new method of geological prospecting. The interpretation of structural planes on drilling holes images is usually done by hand; and results of interpretation may be quite different for different people. Automatic identification system of structural plane (AISSP) can process the digital images of drilling holes to get structural plane parameters automatically. First of all, the images conversion from RGB color space to HSV color space should be done to highlight the structural plane region. Secondly, the *S* component images are filtered and enhanced for the next processing step. After the image segmentation, the binary image edge will be extracted and thinned by image morphology method; and edges of the structural plane are effectively extracted. Finally, structure plane altitude and thickness parameters are obtained by the Hough transform of sine curve and identified edge points. As example, a real digital drilling hole picture is analyzed by AISSP and the space parameters of the 4 structural planes appearing in the picture are calculated. Compared with the results interpreted by people, the results from AISSP are more precise and unique.

Key words: borehole imaging; interpretation of structural planes; image processing; Hough transform

1 引 言

钻孔摄像技术依靠光学原理使人们能够直接观测到钻孔的内部, 被广泛应用于石油工业、工程地质、采矿工程等领域^[1]。最初一段时间, 钻孔摄像获得的图像是模拟信号图像, 只能在此图像基础

上观察判别地质结构, 其中具有代表性的有钻孔照像、侧视旋转式钻孔电视^[2-4]、全景式孔内彩色电视^[5-7]、侧壁轴向观测的双 CCD(charge-coupled device, 电荷耦合元件)钻孔电视^[8]等。随着摄像器材逐步的数字化^[9-10], 通过钻孔摄像得到的图像普遍采用数字格式进行存储。数字格式的图像可以在数字图

收稿日期: 2010-09-22

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 50809036); “十一五”科技支撑计划项目 (No. 2008BAB29B03)。

作者简介: 吴剑, 男, 1973 年生, 博士, 副教授, 主要从事岩土工程方面的研究工作。E-mail: wujian73@163.com

像基础上直接进行图像处理,以期获得图像中的结构信息。

对于钻孔摄像获得的图像资料,需要判读的最基本的图形对象就是结构面,结构面在钻孔孔壁上留下的迹线,在钻孔图像展开为平面图像后,相应展开为正弦曲线。对于结构面的判读,通常由人工给出结构面曲线的控制点,进而由计算机拟合出标准的正弦曲线,确定拟合曲线与图像曲线相符合后,根据拟合参数计算出结构面的几何参数。这个判读的过程由于存在较多的人为参与环节,不仅效率低,而且不同的判读人员可能会给出不同的解释结论,造成解释结果的多样性。本文根据钻孔数字图像的特点,采用了一系列数字图像处理方法,可以逐步完成结构面形态参数的自动提取。

2 基本原理

2.1 结构面在钻孔扫描图像中的形态

采用成像测井仪器^[9]采集的孔壁图像是圆柱面图像,如果把孔壁图像平面展开,结构面在展开图像中的轨迹就应该是一个完整周期的正弦曲线。

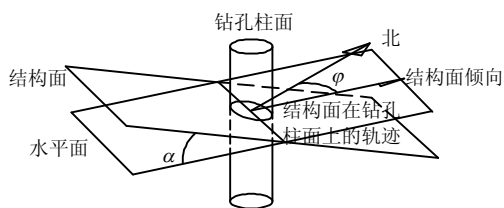


图1 结构面与钻孔的空间位置关系

Fig.1 Spatial relation between structural plane and borehole

假设一个倾斜结构面倾角为 α ,倾斜方向为 φ (北方向为 0°),钻孔内壁直径为 D ,如果钻孔图像 X 、 Y 两个方向的像素尺寸(一个像素宽度代表的实际宽度)相同,展开起始角度为北方向,则结构面在钻孔图像展开图中的轨迹方程为

$$Y = D \tan \alpha \cos(\theta - \varphi) + y_0 \quad (1)$$

式中: θ 和 Y 分别为展开角度和深度值; y_0 为正(余)弦曲线的中线坐标。

实际操作过程中,钻孔的 360° 成像借助指南针完成方向定向,钻孔成像平面展开的起始位置通常也是以南方向为起始方向,这样结构面在展开图像中的展开曲线应为

$$Y = -D \tan \alpha \cos(\theta - \varphi) + y_0 \quad (2)$$

对钻孔扫描图像中结构面特征的自动识别需

要在图像基础上提取这个曲线的边界,最终拟合出正(余)弦曲线的波幅和相位角,再进一步换算结构面的几何参数。

2.2 结构面自动辨识流程

要完成从钻孔图像中自动辨识出结构面的几何参数,必须先将原始的图像处理成便于分别辨识对象的数据形式,然后将结构面的图像区域提取出来,再根据结构面图像区域的分布提取出结构面曲线的基本参数。

对钻孔图像的处理以及对结构面对象区域的提取,是实现自动识别而非人工识别的基础,这些环节的处理属于数字图像处理的传统领域,有许多成熟的算法,可以比较选取效率较高的方法进行处理。结构面曲线的提取目前并没有通用的处理算法,需要结合曲线的特征设计有针对性的提取算法。

整个结构面自动辨识程序要依次完成以下几个处理环节:图像空间变换、图像滤波和增强、图像分割、Hough变换和参数提取,最终获得结构面的空间参数。

2.2.1 空间转换

以往的关于颜色分割的定位算法中大都针对RGB颜色,常用的RGB颜色空间并不符合人们对颜色相似性的主观判断,这样的后果是视觉上相近的颜色可能会被分配到不同的量化区间,而视觉上差异较大的颜色则被分配到相同的量化区间。比较接近人对颜色视觉感知的是色度、饱和度和亮度(hue, saturation, value, HSV)空间,HSV颜色模型中, H 代表色度(hue, $0^\circ \leq H < 360^\circ$), S 代表饱和度(saturation, $0 \leq S \leq 1$), V 代表亮度(value, $0 \leq V \leq 1$)。HSV模型对应于画家配色模型,能够较好地反映人对颜色的感知和鉴别能力,更接近于人们对颜色的主观认识,非常适合基于颜色的图像的分割。这种格式的优点在于它将亮度与反应色彩本质的色度与饱和度分开^[11-12]。

文献[13]给出从RGB空间到HSV空间转换的公式,HSV空间和RGB空间之间的转化是可逆的。

2.2.2 图像增强

在一般情况下,各类图像系统中图像的传送和转换总会造成图像的某些降质。如在摄影时,光学系统的失真、相对运动等都会使图像模糊,在传输过程中,由于噪声污染,图像质量会有所下降,因此通常在进行数字图像的图像识别前需要对数字图像进行滤波增强,改善这些图像的质量。图像增强能提高图像的可读性,可以突出目标的轮廓,衰减各种噪声。

图像的增强技术通常有两类方法: 空间域法和频率域法。空间域法主要是在空间域中对图像像素灰度值直接进行运算处理。例如: 将包含某点的一个小区域内的各点灰度值进行平均计算, 用所得的平均值代替该点的灰度值, 这就是通常所说的平滑处理。

图像增强处理的频率域法就是在图像的某种变换域中(通常是频率域中)对图像的变换值进行某种运算处理, 然后变换回空间域。可以先对图像进行傅立叶变换, 再对图像的频谱进行某种修正(如滤波等), 最后将修正后的图像进行傅立叶反变换回空间域中, 从而增强图像。

2.2.3 图像分割

在对图像的研究和应用中, 人们往往仅对图像中的某些部分感兴趣, 这些部分常称为目标或前景(其他部分称为背景), 它们一般对应图像中特定的具有独特性质的区域。为了辨识和分析目标, 需要将这些有关区域分离出来, 在此基础上才有可能对目标进行进一步处理, 如进行特征提取和测量。图像分割就是把图像空间划分成若干个具有某些一致性属性的不重叠区域, 并提取出感兴趣目标的技术和过程。

目前彩色图像的分割方法大致有^[14-19]: ①利用图像灰度统计信息的方法, 典型的有一维直方图阈值化方法、二维直方图阈值化方法和最大熵阈值化方法; ②利用图像中灰度变化最强烈的区域信息方法即边缘检测方法, 是 Marr 理论中主要倡导的方法, 它在图像分割研究领域应用广泛, 其中典型的有 canny 算法、基于多尺度的边缘检测算法和 Marr-Hildreth 算法、高斯-拉普拉斯算子边缘检测等; ③利用图像空间区域信息和光谱信息的图像分割方法, 这类典型分割方法包括区域生长法、区域分裂-合并法、纹理分割和多光谱图像分割等; ④利用图像分割技术进行图像分割的像素分割方法, 这类方法中典型的有模糊分类方法、统计分类方法和神经网络分类方法等。

基于阈值的分割方法是图像分割中十分古老而又简单有效地常用方法。所谓阈值的方法实质是利用图像的灰度直方图信息得到用于分割的阈值。基于阈值的分割方法可以分为全局阈值的方法和局部阈值的方法。

阈值分割方法也可以按照分割得到的结果分为二元阈值分割以及多元阈值分割。在二元阈值分割中, 分割的结果为提取的对象以及背景; 在多元阈值分割中, 分割的结果为根据不同区域的特点得

到的几个目标对象, 所以提取每一个目标需要不同的阈值, 这种方法称为多阈值方法。在实际的图像中, 由于噪声等干扰因素, 直方图往往不能出现明显的峰值, 此时选择的阈值并不能得到满意的结果, 这是由阈值分割的特点所决定的。

2.2.4 Hough 变换法

Hough 变换是 Hough 在 1962 年提出的一种图像边缘检测方法, 它可以识别和检测图像空间的任意解析曲线。Hough 变换的基本思想是把解析曲线从图像空间映射到以参数为坐标的参数空间中, 根据参数空间中一些特征反过来确定曲线的参数值, 从而确定图像空间中各种边界的确定性描述。Hough 变换的主要优点在于: 具有较强的抗干扰能力, 允许待检测的边界曲线不连续, 便于进行并行处理。

传统的 Hough 变换常常用来检测一些简单的曲线, 然而当检测具有 3 个或 3 个以上参数的复杂曲线时, 传统的 Hough 变换存在两方面的不足: 一是计算量大, 需要很长的检测时间; 二是需要很大的存储空间。国内外学者们提出了许多改进方法, 以克服上述不足。这些方法大致可以分为两类: 一类是适合于各种形状曲线检测的方法, 如递归地细分参数空间的快速 Hough 变换 FHT、逐步增加参数空间分辨率的自适应 Hough 变换(AHT)、随机 Hough 变换(RHT)以及多分辨率 Hough 变换(MRHT)等; 另一类是根据待检测对象自身特点而提出的, 如充分利用圆和椭圆的对称特征实现快速检测。本文所要研究的是自动检测正弦曲线问题, 为了减少时间和存储空间的开销, 提高检测速度, 根据正弦曲线的特点分两步实现^[20]: 第 1 步采用投票机制确定正弦曲线的基线位置; 第 2 步采用二维 Hough 变换提取该位置所对应的正弦曲线的幅度和初相位参数。

第 1 步的具体过程为: ①把图像分成左右两等份; ②设置一个一维累加器数组, 并将其各元素初始化为 0; ③对于其中的任意边界点, 执行下面的步骤④~⑦; ④对于其中垂直扫描线上的任意一点, 将配成点对, 执行下面的步骤⑤~⑦; ⑤计算点对的中点纵坐标; ⑥与对应的累加器数组元素的数值加 1; ⑦如此循环直到图像中所有点对均被访问; ⑧寻找累加器数组的峰值位置。

第 2 步采用二维 Hough 变换提取该位置所对应的正弦曲线的幅度和初相位参数确定了基线位置后, 找出构成此基线的点对, 正弦曲线的幅度和初相位仍然是未知参数, 可采用 Hough 变换提取这 2 个参数。基本原理如下: 有任意一点对(P_m 与 Q_m), 两点相隔曲线的半个周期, 在与之对应的 1/4 个周

期的位置上也存在一点对 $(P_n \text{ 与 } Q_n)$ ，在已知基线位置且幅值大于 0 的条件下，可以通过 P_m 和 P_n 两点按如下方法解得初始相位角和幅值。

设 P_m 的坐标为 (t_m, Y_m) ， P_n 的坐标为 (t_n, Y_n) ，如果 P_m 坐标满足三角函数方程 (3)，则 P_n 坐标应符合方程 (4)，其中 A 、 w 、 φ 分别为三角函数的波幅、角速度和初始相位角。

$$Y_m = A \sin(wt_m - \varphi) + y_0 \quad (3)$$

$$Y_n = A \sin(wt_n - \varphi) + y_0 = A \sin(wt_m + \frac{\pi}{4} - \varphi) + y_0 = A \cos(wt_m - \varphi) + y_0 \quad (4)$$

将式 (3) 除以 (4) 可得

$$\frac{Y_m - y_0}{Y_n - y_0} = \frac{A \sin(wt_m - \varphi)}{A \cos(wt_m - \varphi)} = \tan(wt_m - \varphi) \quad (5)$$

可先通过式 (5) 计算得到初始相位值，再将计算得到的初始相位值代入式 (3) 或式 (4)，可以计算得到幅值。

图像处理具体步骤如下：①统计基线位置对应的点对，提取在 $0 \sim 1/4$ 周期和 $1/4 \sim 1/2$ 周期中的点；②设置一个一维累加器数组，并将其各元素初始化为 0；③对于前 $1/4$ 周期的任意点，执行步骤④~⑦；④找到与之相差 $1/4$ 个周期的点；⑤联立计算得到初始相位值及幅值；⑥与对应的累加器数组元素的数值加 1；⑦如此循环直到所有点均被访问；⑧寻找累加器数组的峰值位置，其峰值位置对应的即为该正弦曲线的初始相位角及幅值。

3 实例分析

图 2(a)是由钻孔摄像系统获得一段的含有 4 条结构面的孔壁展开图像，图 2(b)中所绘粗实线是经过人工辨识绘制的 4 条结构面的轨迹曲线。

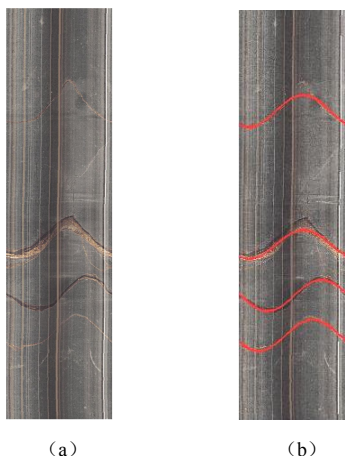


图2 钻孔摄像取得的原始图像

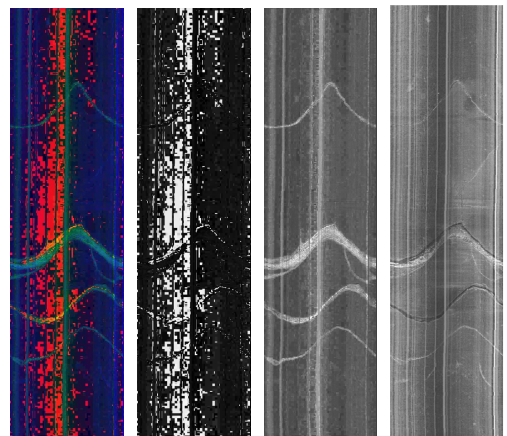
Fig.2 Original images from borehole camera system

3.1 图像空间转换和图像分割

在 RGB 空间下，由于结构面所占像素比较少且颜色与背景色一致，故而很难从里面将结构面信息提取出来，常将图像转换到 HSV 空间中进行分析，图 3 为 HSV 图像以及各分量图。其中 S 分量图适宜提取结构面信息。

3.2 图像的增强

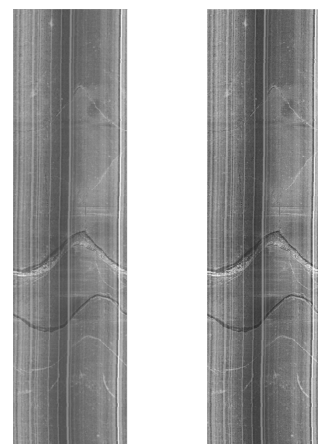
图像的增强算法很多，这里选择了常用的均质滤波和高斯滤波方法进行图像的滤波处理。图 4 分别是经过均质滤波和高斯滤波后得到的图像，由于该钻孔图像质量较好，经过这两种方法得到图像质量差别不大。但在很多情况下，钻孔数字摄影得到的数字图像质量受环境干扰很大，在这种情况下，图像的滤波和增强就显得非常必要。



(a) HSV图 (b) H分量图 (c) S分量图 (d) V分量图

图3 HSV 图像

Fig.3 Images on HSV space



(a) 均值滤波 (b) 高斯滤波

图4 滤波后得到的图像

Fig.4 Images filtered

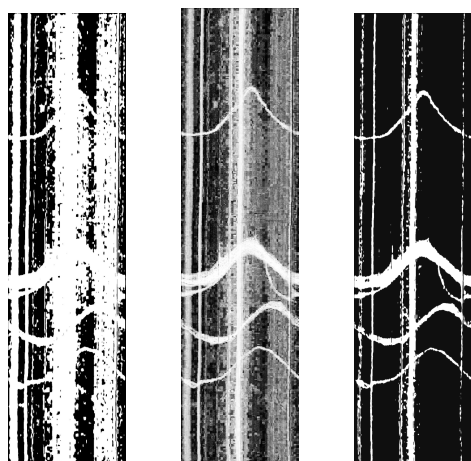
3.3 结构面图像区域的分割

图像阈值化处理实质上是一种图像灰度级的非线性预算，阈值处理可用方程加以描述，并且随

阈值的取值不同,可以得到具有不同特征的二值图像。灰度阈值法只要选取一个适当的灰度级阈值,然后将每个像素灰度和它进行比较,将灰度点超过阈值的像素点重新分配以最大灰度(如 255),低于阈值的像素点分配以最小灰度(如 0),那么,就可以组成一个新的二值图像,这样可以把目标从背景中分割开来。

这里采用了 3 种图像分割方法,分别是 C 均值聚类分割、模糊 C 均值聚类分割和全局阈值法。第 1、2 种方法需要先指定一个大致聚类中心,存在一定的人为误差,而第 3 种方法由统计计算得到,可以排除人为因素,故在图像分割是优先采用第 3 种方法。

图 5 是采用不同的分割算法对图像区域进行了分割,其中 C 均值聚类分割阈值取 31,模糊 C 均值聚类值取 55,全局阈值法分割值取 48。全局阈值法中最大类间方差算法得到的分割图像比较适于搜索结构面图像区域边界。



(a) C 均值聚类分割 (b) 模糊 C 均值聚类 (c) 全局阈值法分割

图5 分割后得到的图像

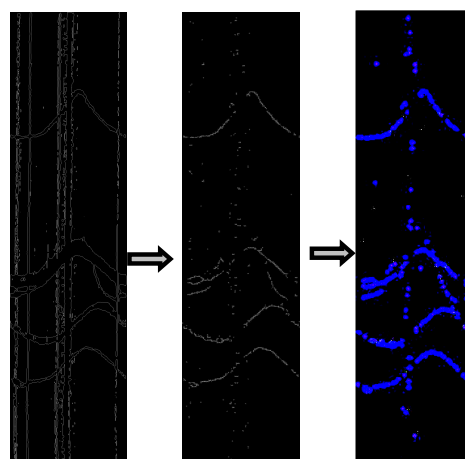
Fig.5 Images extracted

3.4 图像数学形态处理

对分割后的图像进行数学形态学上的处理(见图 6),主要是寻找到需要辨识的曲线边缘,并在寻找过程中对边缘细化,筛除非曲线边缘,最后经过条分化得到曲线边缘点集。

3.5 曲线参数的提取

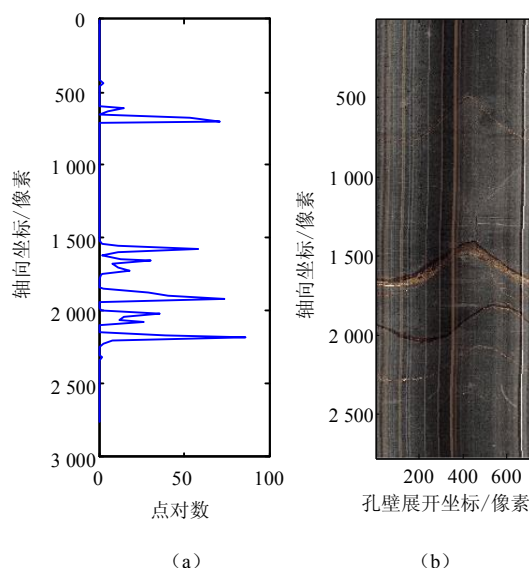
曲线参数的提取先采用 Hough 变换检测进行结构面识别,具体来讲,首先要得到正弦曲线的中心位置,图 7 (a) 为不同深度位置边缘点的累加值,超过 50 的 4 个峰值对应 4 条结构面曲线的中心位置,其像素坐标分别为 700、1 570、1 920、2 180。



(a) 边缘图 (b) 去除异常后 (c) 条分化后点图

图6 数学形态处理后的图像

Fig.6 Images processed by mathematical morphological method



(a) 正弦曲线中心搜索

Fig.7 Searching for the sine curve center

采用一个阈值可判断累加器数组的峰值位置,即可求出正弦曲线的基线位置。确定以后,采用 Hough 变换检测与相对应的正弦曲线的幅度和初相位,获得的曲线方程。从图像中提取的 4 条余弦曲线的方程以及像素宽度如下(这些曲线方程是基于像素坐标的):

(1) 第 1 条曲线

$$Y = -107.97 \cos(\theta - 3.75) + 683.8 \quad (6)$$

结构面像素宽度为 23。

(2) 第 2 曲线

$$Y = -97.7 \cos(\theta - 3.76) + 1583.4 \quad (7)$$

结构面像素宽度为 81。

(3) 第 3 曲线

$$Y = -106.1\cos(\theta - 4.82) + 1\,927.3 \tag{8}$$

结构面像素宽度为 41。

(4) 第 4 曲线

$$Y = -106.6\cos(\theta - 4.31) + 2\,196.8 \tag{9}$$

结构面像素宽度为 19。

图像 Y 方向的单位像素宽度为 0.334 2 mm，经过换算可以得到实际的波幅，而钻孔直径为 66 mm，据此可求出结构面的倾角。

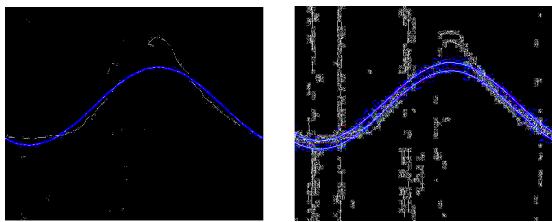


图 8 第 1 结构面的边缘形态
Fig.8 Edge shapes of the first structural plane

4 个结构面的几何参数如表 1 所示。为了对比程序自动判读与人工判读的差异，表中还列出了人工判读得到的结构面几何参数。从表中数据可以看出，通过程序自动识别出的结构面空间参数与人工判读的结果大体一致，说明自动识别方法可以实现从钻孔数字图像中提取结构面空间参数。

人工判读结构面产状参数，不同的人可以判读出不同的结果，而程序自动识别的结构面产状参数不仅是惟一值，参数精度也大大提高。

表 1 钻孔图像中提取的结构面参数
Table 1 parameters of structural plane extracted from the image of borehole

编号		产状			厚度 /mm
		倾角 /(°)	倾向 /(°)	走向 /(°)	
1	自动判读	47.6	214.6	-55.4	7.7
	人工判读	40.0	206.0	-64.0	
2	自动判读	44.7	215.5	-54.5	27.1
	人工判读	46.0	205.0	-65.0	
3	自动判读	47.1	276.2	6.2	14.4
	人工判读	43.0	277.0	7.0	
4	自动判读	47.2	247.0	-23.0	6.3
	人工判读	44.0	235.0	-35.0	

注：走向角度正角为北东（NE），北方向为 0。

4 结 论

(1) 通过一系列的数字图像处理，可以直接从钻孔数字图像中提取岩体结构面的空间信息，这一

过程避免了人工识别的主观性，可以实现结构面的快速自动识别和参数提取。

(2) 自动提取岩体结构面的空间信息需要经过钻孔数字图像的 HSV 空间转换、结构面区域的增强、结构面区域的分割，最终通过正弦曲线的 Hough 变换，确定结构面正弦曲线的参数。

致谢：本研究得到日本大地扫描研究会（Earth Scanning Association）的资助。文中使用了该研究会提供的图像数据，笔者在此表示感谢！

参 考 文 献

[1] 王川婴, LAW KTIM. 钻孔摄像技术的发展与现状[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(19): 3440—3448.
WANG Chuan-ying, LAW KTIM. Review of borehole camera technology[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(19): 3440—3448.

[2] KANAORI YUJI. Observation of crack development around an under-ground rock chamber by borehole television system[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 1983, 16(2): 133—142

[3] BEYER R, JACOBS A M. Borehole T V[J]. Engineering and Mining Journal, 1986, 187(5): 36—38.

[4] BEYER R, JACOBS A M. Borehole television for geotechnical investigations[J]. International Water Power and Dam Construction, 1986, 38(9): 16—18.

[5] 于景良, 王德福, 倪志刚, 等. 全景电视系统的研究[J]. 天津大学学报, 1990, 3(2): 91—97.
YU Jing-liang, WANG De-fu, NI Zhi-gang, et al. Research on panoramic television system[J]. Journal of Tianjin University, 1990, 3(2): 91—97.

[6] 于景良, 王德福, 孙鼎俊. 全景式孔内彩色电视系统的研制及其应用[J]. 大坝观测与土工测试, 1996, 20(4): 30—32.
YU Jing-liang, WANG De-fu, SUN Ding-jun. The development of panoramic borehole color tv system and its application [J]. Dam Observation and Geotechnical Tests, 1996, 20(4): 30—32.

[7] 王川婴, 葛修润, 白世伟. 前视全景钻孔电视及其应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(增刊 1): 1687—1691.
WANG Chuan-ying, GE Xiu-run, BAI Shi-wei. Axial view panoramic borehole tv and its application [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001, 20(Supp.1): 1687—1691.

[8] BARBOUR JOEL. Side scan down hole video tool

- having two camera[P]. United States Patent: US 5652617, 1997-07-29.
- [9] 王川婴, 葛修润, 白世伟. 数字式全景钻孔摄像系统及应用[J]. 岩土力学, 2001, 22(4): 523—526
- WANG Chuan-ying, GE Xiu-run, BAI Shi-wei. The digital panoramic borehole camera system and its application [J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2001, 22(4): 523—526.
- [10] 葛修润, 王川婴. 数字式全景钻孔摄像技术与数字钻孔[J]. 地下空间, 2001, 21(4): 254—261.
- GE Xiu-run, WANG Chuan-ying. Digital panoramic borehole camera technique and digital borehole [J]. **Underground Space**, 2001, 21(4): 254—261.
- [11] 张全海, 施鹏飞. 基于 HSV 空间彩色图像的边缘提取方法[J]. 计算机仿真, 2000, 17(6): 25—27, 32.
- ZHANG Quan-hai, SHI Peng-fei. Color image edge detecting method base on HSV color space [J]. **Computer Simulation**, 2000, 17(6): 25—27, 32.
- [12] 韩丽娜, 熊杰, 耿国华, 等. 利用 HSV 空间的双通道同态滤波真彩图像增强[J]. 计算机工程与应用, 2009, 45(27): 18—20, 58.
- HAN Li-na, XIONG Jie, GENG Guo-hua, et al. Using HSV space real-color image enhanced by homomorphic filter in two channels [J]. **Computer Engineering and Applications**, 2009, 45(27): 18—20, 58.
- [13] SMLTH John R, CHANG SHIH FU. Tools and techniques for color Image retrieval[C]// Proc. of SPIE Storage and Retrieval for Image and Video Databases IV. [S.l.]:[s.n.], 1996: 426—437.
- [14] 袁天云, 姜志国. 目标分割图中粘连对象的自动切割和分离[J]. 中国体视学与图像分析, 2003, 8(1): 40—43.
- YUAN Tian-yuan, JIANG Zhi-guo. Automatic splitting and separating overlapped objects in target-segmented image[J]. **Chinese Journal of Stereology and Image Analysis**, 2003, 8(1): 40—43.
- [15] 陆振晔, 范影乐. 基于数学形态学的重叠细胞分离方法及比较研究[J]. 计算机工程与应用, 2004, 40(6): 57—59.
- LU Zhen-ye, FAN Ying-le. Comparison of several algorithms based on mathematical morphology of overlapped cells segmentation[J]. **Computer Engineering and Applications**, 2004, 40(6): 57—59.
- [16] 殷蔚明, 王典洪. Otsu 法的多阈值推广及其快速实现[J]. 中国体视学与图像分析, 2004, 9(4): 219—223.
- YIN Wei-ming, WANG Dian-hong. Rapid segmentation of chromatic bone marrow cell images[J]. **Chinese Journal of Stereology and Image Analysis**, 2004, 9(4): 219—223.
- [17] 汪莉, 蒋大林. 利用 HSI 颜色模型提取真菌孢子[J]. 仪器仪表学报, 2006, 27(6): 337—339.
- WANG Li, JIANG Da-lin. Application of HSI color model on the segmentation of spore image [J]. **Chinese Journal of Scientific Instrument**, 2006, 27(6): 337—339.
- [18] 汪鼎文, 李元香. 基于 HSI 颜色空间的 X 射线彩色图像分割[J]. 计算机工程与设计, 2006, 27(1): 139—141.
- WANG Ding-wen, LI Yuan-xiang. X-ray color image segmentation based on HSI model[J]. **Computer Engineering and Design**, 2006, 27(1): 139—141.
- [19] 吴大伟, 俞昌. 彩色骨髓相的快速分割[J]. 清华大学学报, 2005, 45(7): 951—954.
- WU Da-wei, YU Chang. Rapid segmentation of chromatic bone marrow cell images[J]. **Journal of Tsinghua University(Science and Technology)**, 2005, 45(7): 951—954.
- [20] 邹长春, 史譔. 一类正弦曲线的 hough 变换快速检测方法[J]. 计算机工程与应用, 2002, (4): 1—3, 78.
- ZOU Chang-chun, SHI Ge. A fast approach to detect a kind of sinusoidal curves using hough transform [J]. **Computer Engineering and Applications**, 2002, (4): 1—3, 78.