DOI：10.16285/j.rsm.2017.10.038

孔壁钻孔图像的结构面参数提取方法研究

汪进超[1, 2]，王川婴[1]，胡 胜[1]，韩增强[1]，王益腾[1, 2]

（1. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室，湖北 武汉 430071；2. 中国科学院大学，北京 100049）

摘 要：为了提升岩体结构面参数提取的自动化程度以及准确性，结合钻孔图像中岩体结构面的特性，开展了适用于结构面图像预处理和结构面参数提取的方法研究。首先，采用自适应中值滤波法对钻孔图像进行去噪处理，通过对梯度算子法和最大类间方差法的图像分割进行比较，提出了更适用于实际钻孔图像分割的改进方差法，即结合梯度算子与最大类间方差法；然后对分割后的图像进行 Canny 算子边缘检测；最后，通过多项式曲线拟合获得结构面的正弦曲线，从而计算出岩体结构面的参数——倾向、倾角和隙宽。通过将提取方法与传统的手动识别结果进行对比，其结果表明：提取方法获取的参数较为精确。从而证明了该结构面参数提取方法具有可行性和准确性，且提取效率高于传统的手动识别。

关 键 词：钻孔摄像；钻孔图像；结构面提取；产状；隙宽

中图分类号：TU 452 **文献标识码：**A **文章编号：**1000－7598 (2017) 10－3074－07

A new method for extraction of parameters of structural surface in borehole images

WANG Jin-chao[1, 2], WANG Chuan-ying[1], HU Sheng[1], HAN Zeng-qiang[1], WANG Yi-teng[1, 2]

（1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China）

Abstract: This study aims to improve the automation and accuracy of extracting parameters of rock mass structural planes. By considering rock mass characteristics of the structural plane in borehole images, a new method was developed for the pre-processing of structural plane image and the extraction of structural plane parameter. First, the noise in borehole images was removed with an adaptive median filtering method. An improved variance method was also proposed by comparing the gradient operator method and the maximum interclass variance method, which is more suitable for the actual borehole image segmentation. Then, a Canny operator was used to detect the edge of segmented images. Finally, the sine curve of the structural plane was obtained by the polynomial curve fitting, and thus the structural plane parameters including dip, dip angle and width were calculated. The comparison of results obtained by the proposed extraction method and the traditional manual recognition shows that the proposed method is more accurate. Therefore, it is demostrated that the proposed method is feasible and accurate, and its extraction efficiency is higher than the traditional manual method.

Keywords: borehole camera; borehole image; structural plane extraction; structural plane attitude; structural surface width

1 引 言

随着我国经济建设的快速发展，尤其是西部大开发战略的实施，大型水利水电、能源交通等基础设施的建设正在掀起一个新的高潮，特别是水利水电工程建设的规模和水平也正在向大型、超大型发展，而大型土木工程建设通常将岩体作为建筑物的地基和环境。不同建造的岩体在漫长的地质历史时期曾遭受过多期的构造运动，以及浅表地质作用的改造，使得岩体中广泛存在产状不同、规模不等、性质各异的结构面。岩体存在的结构面会使岩体具有显著的结构特性，如复杂性、非连续性、各向异性等特性，从而构成岩体中的薄弱部分，成为控制岩体稳定性的重要因素之一[1−2]。

钻孔摄像技术[3]能够获取钻孔内岩体结构面的高精度图像，能够获取钻孔内地质结构面的特征参数，目前，该技术在工程中应用较为广泛。然而，岩体结构面的参数提取目前还主要停留在人工获取阶段，不同的提取人员可能会因人为原因而得出不同的识别结果，造成获取的参数不够精确，此外，

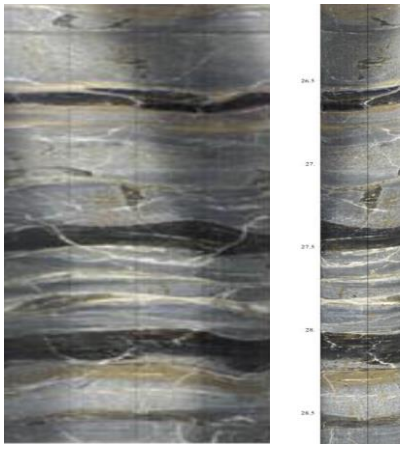
收稿日期：2016-07-25
第一作者简介：汪进超，男，1988 年生，博士研究生，主要从事岩土测试方面的研究工作。E-mail: wangjinchao_88@163.com
通讯作者：王川婴，男，1962 年生，博士，博导，研究员，主要从事钻孔摄像技术和数字岩土方面的研究工作。E-mail: chywang@whrsm.ac.cn

当工程量较大时，参数提取将耗费大量的人力和物力，且效率低下[4]。

因此，对钻孔摄像技术获取的高精度数字钻孔孔壁图像进行数字图像处理，建立实用、方便、准确的岩体结构面的参数提取分析方法，获取结构面倾向、倾角、隙宽等信息，实现结构面参数提取的自动化，将会是一项崭新课题。本研究中的参数提取方法主要是根据钻孔图像中结构面的特点，来提升识别效果、自动化程度及参数提取的准确性，从而实现适用于钻孔内壁的岩体结构面参数提取。

2　钻孔摄像

数字式全景钻孔摄像系统[5−8]的核心技术是全景和数字技术的突破。锥面镜能够反射钻孔内壁的360 °地质信息，再叠加方位信息之后能够形成展开平面的全景图像[9]，在通过对图像的逆变换算法后，能够还原真实的钻孔孔壁状态，形成钻孔内壁的数字图像。探头内置的 CCD 摄像头能够观察锥面镜的图像情况，且观察点位于镜面镜轴心上部，观察的图像是钻孔孔壁经过锥面镜所反射出来的全景图像，将全景图像经过图像处理，变换形成钻孔孔壁的 360 °图像称为平面展开图，如图 1(a)所示，平面展开图能够帮助识别钻孔孔壁内的结构面地质信息；以三维岩芯形式展现的半个孔壁图像称为柱状图，如图 1(b)所示。由于通过钻孔摄像系统获取的平面展开图能够更直观地呈现出钻孔壁的全部结构面特征，在本研究中均以平面展开图为图像基础进行参数提取。



(a) 平面展开图　　(b) 柱状图

图 1　平面展开图及柱状图

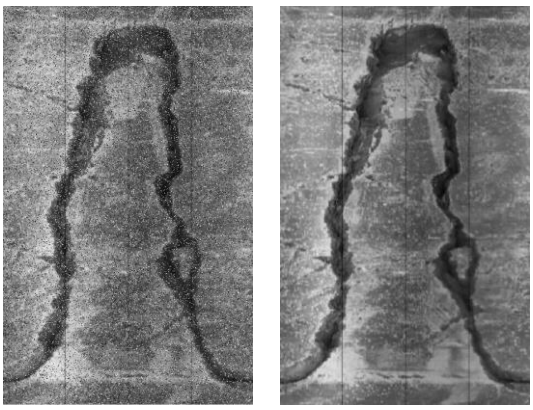
Fig.1　Plan image and histogram

3　结构面图像预处理

3.1　图像去噪

由于地质钻孔内的环境具有复杂性，如光照不均匀、透射液体浑浊等，以及外界各种信号产生的噪声，均会对钻孔图像产生干扰，从而形成具有噪声的钻孔图像，因此，有必要对形成的钻孔图像进行去噪处理。自适应中值滤波[10]能够有效地保留图像边缘特征，因此，本文选取自适应中值滤波法进行图像去燥。自适应中值滤波法的原理是由噪声密度调整滤波窗口的大小，并采用不同的处理方法对噪声点和信号点进行处理，然后对噪声点进行中值滤波，对信号点保持其灰度值不变。

采用数字式全景钻孔摄像系统获取产状为 N15°E∠60°、隙宽为 90 mm 的岩体结构面钻孔图像，原始平面展开图如图 2(a)所示，将图像进行自适应中值滤波算法处理后，与原始图像进行对比，其结果如图 2 所示。从对比图中可以看出，自适应中值滤波算法能够有效地降低钻孔图像噪声。



(a) 原始图像　　(b) 处理后图像

图 2　原始图像和处理后对比图

Fig.2　Original image and processed image

3.2　图像分割

为了提取图像中需要研究的目标，需要将图像分成若干个特定的、具有独特性质的区域，即进行图像分割处理。阈值分割[11]为较常用的图像分割技术，它是利用灰度阈值变换来进行分割图像，首先确定像素点的一个阈值，然后把每个像素点的灰度值和确定的阈值进行比较，根据比较结果把该像素点视为前景或者背景。数字钻孔图像中的结构面在灰度上具有相似性，且结构面的灰度值与非结构面区域的灰度值存在一定差异，因此，本研究通过确定合适的阈值将结构面与非结构面分离，形成二值图像，其计算式[12]为

$$g(x,y)=\begin{cases}1 & f(x,y)\geqslant T\\ 0 & f(x,y)<T\end{cases} \tag{1}$$

通常采用最大类间方差法[10]进行图像分割。设钻孔图像的灰度范围为[0,..., L−1]，灰度为 i 的像素

为 n_i，其出现概率为 $p_i=n_i/N$，N 为总的像素数，其值为

$$N=\sum_{i=0}^{L-1}n_i \tag{2}$$

如果采用 T 作为像素阈值，可以将钻孔图像分成 C_1 和 C_2 两类，C_1 由灰度值在[0, T−1]的像素组成，C_2 由灰度值在[T, L−1]的像素组成。则区域 C_1 和 C_2 的概率 P_1、P_2 分别为

$$P_1=\sum_{i=0}^{T-1}p_i \tag{3}$$

$$P_2=\sum_{i=T}^{L-1}p_i \tag{4}$$

区域 C_1 和 C_2 的平均灰度 μ_1、μ_2 分别为

$$\mu_1=\frac{1}{P_1}\sum_{i=0}^{T-1}ip_i \tag{5}$$

$$\mu_2=\frac{1}{P_2}\sum_{i=T}^{L-1}ip_i \tag{6}$$

整幅钻孔图像的平均灰度 μ 为

$$\mu=\sum_{i=0}^{L-1}ip_i=P_1\mu_1+P_2\mu_2 \tag{7}$$

两个区域的总方差 σ_B^2 为

$$\sigma_B^2=P_1(\mu_1-\mu)^2+P_2(\mu_2-\mu)^2=P_1P_2(\mu_1-\mu_2)^2 \tag{8}$$

让 T 在[0，L−1]范围内依次取值，使 σ_B^2 最大的 T 值便是最佳区域分割阈值。最大类间方差法原理简单、处理速度较快，适应于双峰的直方图，但实际图像很多呈现单峰或者多峰，从而导致最大类间方差法不能够很好地适应实际钻孔图像。

钻孔图像中的结构面灰度值与非结构面区域的灰度值存在一定差异，结构面的分界边缘处相邻像素点灰度值变化较大，因此，可以利用梯度来表示结构面边缘处的不连续性，从而实现结构面的锐化[13]。将钻孔图像定义为一个二维函数 $f(x,y)$，其梯度定义为

$$\nabla f=\mathrm{grad}(f)=\begin{bmatrix}G_x\\G_y\end{bmatrix} \tag{9}$$

式中：G_x、G_y 为近似的一阶偏导数。

其幅度值大小为

$$|\nabla f(x,y)|=\sqrt{G_x^2+G_y^2} \tag{10}$$

因此，为了更好适应实际钻孔图像分割，首先采用梯度算子法进行处理，实现锐化结构面区域，然后再将梯度算子提取的数据进行分类，分成 C_1 和 C_2 两类，最后按照最大类间方差法进行图像分割。该图像分割方法是将梯度算子与最大类间方差法相结合进行图像分割的方法，即改进的方差法。该方法的具体步骤为：先将去噪处理后的钻孔图像 F_1 进行梯度处理，形成梯度图像 F_2，将 F_2 进行二值化，得到二值图像 F_3，随后将图像 F_1 与 F_3 的二维数组对应点相乘得到新的图像 F_4，最后利用最大类间方差法处理图像 F_4，得到阈值 T，该 T 即为适合图像 F_1 的最佳阈值。流程图如图 3 所示。

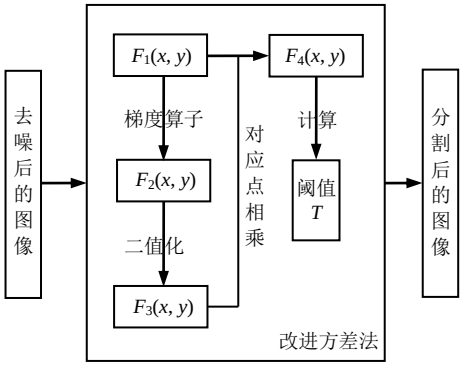


图 3 改进方差法计算流程图

Fig.3 Flow chart of the improved variance method

将进行去噪处理后的钻孔图像分别采用梯度算子、最大类间方差法和改进方差法进行图像分割，其结果如图 4 所示，从图中可以看出，单纯采用梯度算子或者最大类间方差法存在很多干扰信息，不能够明显区分出孔壁结构面，而采用改进方差法能够很明显地锐化钻孔图像中的结构面区域，消除各种非结构面信息的干扰，具有很好的效果，也证明改进方差法的适应性强，能够取得较理想的处理结果。



(a) 梯度算子 (b) 最大类间方差法 (c) 改进方差法

图 4 图像分割效果对比图

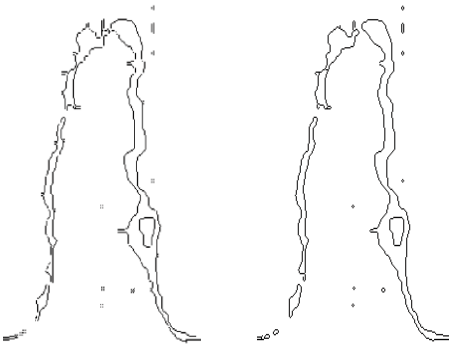
Fig.4 Plane expansion diagram

3.3 边缘检测

图像局部亮度变化最显著的部分称为边缘，边缘主要存在于目标与目标、目标与背景、区域与区域之间。两个不同灰度值的相邻区域之间总存在着

边缘，它是灰度值不连续的结果。对于这种不连续，可以通过求导数的方法进行检测，较常用的算法为 Prewitt 算子[14−15]和 Canny 算子[16−18]。Prewitt 算子通常取较大的幅度作为输出值，这使得它们对边缘的走向有些敏感。Canny 边缘检测首先采用高斯函数对图像进行平滑处理，通过每点的梯度方向上判断此点强度是否为其领域的最大值来确定该点是否为边缘点，然后利用非极值抑制技术进行处理得到边缘图像。全局的梯度并不足以确定边缘，必须保留局部梯度最大的点，而抑制非极大值。

对分割后的图像分别进行 Prewitt 算子边缘检测和 Canny 算子边缘检测，其处理结果对比，发现采用 Canny 算子的获取边缘更平滑，如图 5 所示，故本方法选取 Canny 算子进行边缘检测。



(a) Prewitt 算子　　(b) Canny 算子

图 5　图像分割效果对比图

Fig.5　Contrast of image segmentation

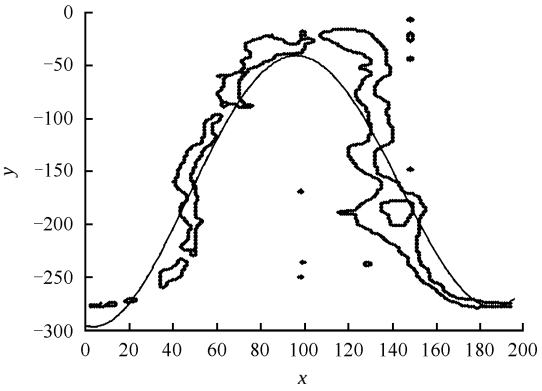
4　结构面参数提取

4.1　曲线拟合

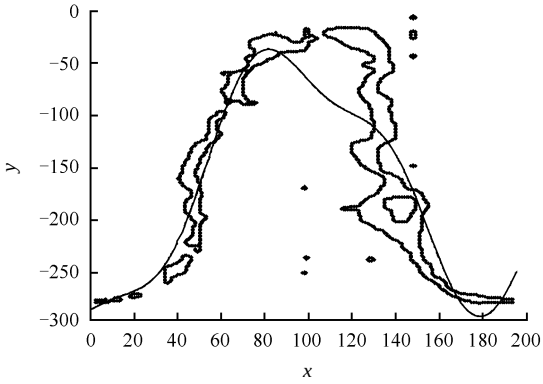
当人们对研究对象的内在特性和各因素间的关系有比较充分的认识时，通常才用机制分析的方法建立描述的数学模型，再用曲线拟合的方法确定模型中的参数。由于受客观事物内部规律的复杂性及人们认识程度的限制，无法建立合乎机制规律的数学模型，通常只能对观测数据进行分析，绘制散点图，先猜测其形式，然后选出拟合数据较好的函数类型。

钻孔摄像展开图中的结构面呈曲线状，为了更好地获取结构面参数，需要对结构面曲线进行拟合。在曲线拟合时，并不要求拟合曲线经过结构面上的每一个数据点，只需能够反映出结构面的变化趋势，使钻孔图像中数据点的误差平方和最小。

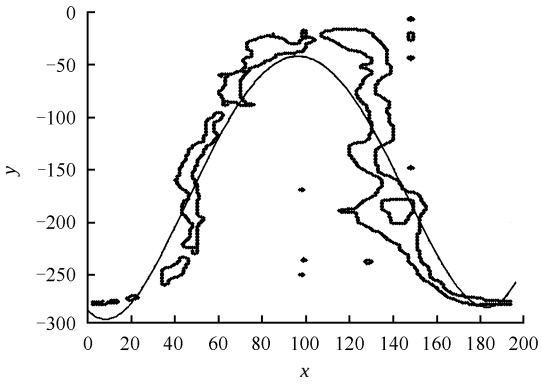
结构面的曲线拟合步骤为：在进行改进方法处理后，采用拟合工具箱对采样点进行拟合，根据不同目标曲线的拟合度，选取更为合适的曲线代表结构面信息。针对图 5(b)的曲线特征，选取正弦曲线逼近和多项式逼近进行比较，拟合结果如图 6 所示。



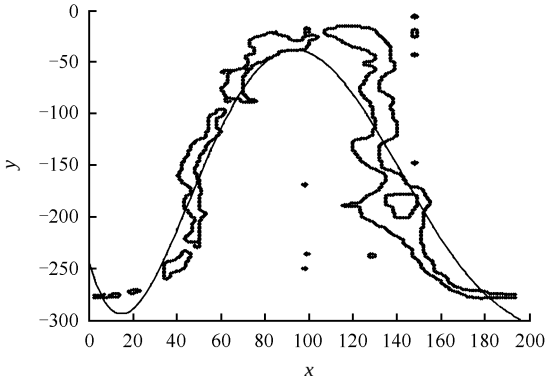
(a) $y=a_1\sin(b_1x+c_1)+a_2\sin(b_2x+c_2)$拟合形式



(b) $y=a_1\sin(b_1x+c_1)+...+a_3\sin(b_3x+c_3)$拟合形式



(c) $y=p_1x^4+p_2x^3+p_3x^2+p_4x+p_5$ 拟合形式



(d) $y=p_1x^5+p_2x^4+...+p_4x^2+p_5x+p_6$ 拟合形式

图 6　结构面曲线拟合图

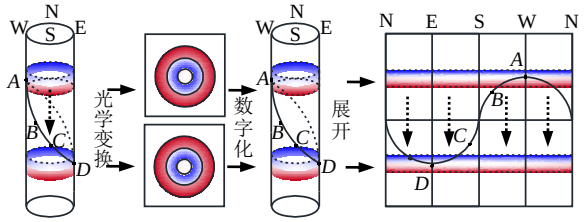
Fig.6　Curve fitting of the structural plane

通过对比 4 种不同目标曲线的拟合度，发现图 5(c)更适合采用四次多项式进行结构面拟合，即采用四次多项式曲线能够代表图 2 中原始钻孔图像的结构面信息特征。四次多项式信息为

$$\left.\begin{aligned} &f(x)=p_1x^4+p_2x^3+p_3x^2+p_4x+p_5\\ &p_1=4.178\times10^{-6}\ (3.621\times10^{-6},\ 4.734\times10^{-6})\\ &p_2=-0.001\ 601\ (-0.001\ 819,-0.001\ 382)\\ &p_3=0.166\ (0.137\ 3,\ 0.194\ 8)\\ &p_4=-2.375\ (-3.849,\ -0.9)\\ &p_5=-283.3\ (-3.09.9,\ -256.6) \end{aligned}\right\}\quad(11)$$

4.2 参数获取

在地质钻孔内部，岩体结构面完全贯穿钻孔时，任一条结构面与钻孔孔壁相交的平面 *ABCD*，在经过全景变换、孔壁重建，最后将孔壁眼正北向展开成平面展开图，得到的曲线是一条标准的正弦曲线，如图 7 所示。



(a) 原位孔壁 (b) 全景图像 (c) 重建孔壁 (d) 平面展开图

图 7 全景钻孔图像及平面展开示意图

Fig.7 Schematic of panoramic borehole image

4.2.1 结构面产状

岩体的结构面产状包括倾向和倾角两个参数，结构面在平面展开图上呈现出正弦曲线状的图像，其中最小值点的方位能够表示出该结构面的倾向 α。根据结构面的拟合曲线，通过像素点坐标位置之间的关系可以计算出倾向为

$$\alpha=\frac{2x_{\min}\Delta w}{d}\quad(12)$$

式中：$x_{\min}$ 为拟合曲线中最小值点所在像素点的横坐标值；d 为结构面所在钻孔直径；Δw 为钻孔图像的横向像素宽度。

以图 6(c)为例进行分析，钻孔直径为 72 mm，Δw=1.13 mm，$x_{\min}$=8.003，代入式（12），可以计算出图中结构面的倾向 α=0.251，即图中结构面的倾向大致为 N14.39°E。

可以通过正弦曲线的最大值点和最小值点之间的垂直距离与钻孔直径之比的反正切函数求得结构面的倾角 β。根据结构面的拟合曲线，通过像素点坐标位置之间的关系可以计算出倾角为

$$\beta=\arctan\frac{(y_{\max}-y_{\min})\Delta h}{d}\quad(13)$$

式中：$y_{\max}$ 为拟合曲线中最高值点所在像素点的纵坐标值；$y_{\min}$ 为拟合曲线中最低值点所在像素点的纵坐标值；Δh 为钻孔图像纵向像素宽度。

以图 6(c)为例进行分析，钻孔直径为 72 mm，$y_{\max}$=−65，$y_{\min}$=−295，Δh=3.333 mm，代入式（13），可以计算出图中结构面的倾角 β=1，即图中结构面的倾角大致为 57.33°。

4.2.2 结构面隙宽

通常将结构面两相邻岩壁间的垂直距离称为结构面宽度，它可以由钻孔展开图像中结构面两条边界上的两点间的垂直距离换算得到。通过预处理，可以获得结构面的二值离散点，通过计算各离散点的纵坐标差的均值，求出钻孔图像中结构面的间距，然后根据间距与隙宽的关系，即可得出结构面的真实隙宽值 D，其关系式为

$$D=\frac{\sum_{i=1}^{C}\Delta y_i\Delta h\Delta w\cos\beta}{\pi d}\quad(14)$$

式中：C 为钻孔图像的二值图像总列数；Δy_i 为二值图像第 i 列边缘点的纵坐标之差。

以图 6(c)为例进行分析，钻孔直径为 72 mm，纵坐标之差和为 9 266.525，Δw=1.13 mm，Δh=3.333 mm，β=57.33°，代入式（14），可以计算出图中结构面的隙宽 D=83.33 mm，即图中结构面的真实隙宽大致为 83.33 mm。

4.3 结果比较

图 2 中的原始钻孔图像对应的实际岩体结构面产状为：倾向为 N15°E，倾角为 60°，隙宽为 90 mm，该数据通过专用测量工具获得。常规的基于钻孔图像的岩体结构面提取方法为手动提取，即在形成的钻孔平面展开图像上，不经过任何图像预处理，直接通过经验判断出结构面上的最高值点、最低值点、以及其他一点，软件通过获取该 3 点形成一条正弦曲线，根据形成的正弦曲线计算出结构面产状；需要获取结构面隙宽时，手动让软件获取任选两点坐标信息，它们的纵坐标之差即为隙宽。对图 2 中的原始图像分别进行改进的自动识别和传统的手动提取，对其结果进行对比，其结果如表 1 所示，

从对照表 1 可以看出，直接获取真实的结构面参数精度不够高，而采用钻孔摄像技术获取的结构面参数精度较高。传统的手动提取与分析者经验关

系较大，且被分析的钻孔图像未进行图像预处理，容易受主观判断影响。而采用本参数提取方法能够更客观地提取结构面参数。通过将自动提取与手动提取的参数提取结果进行对比可以看出，自动识别出的结构面参数比较准确，且整体误差率（误差 2）低于传统手动提取（误差 1），此外，自动识别的提取效率明显高于手动提取，从而证明该结构面参数提取方法具有可行性和准确性。

表 1　手动提取和自动识别结果对照表

Table 1　Results obtained by the manual extraction and automatic recognition

参数获取方法及误差	倾向α	倾角β/(°)	隙宽D/mm	平均误差/%
实测结构面	N15°E	60.00	90.00	
手动提取	N13.3°E	64.41	97.60	
自动识别	N14.39°E	57.33	83.33	
误差 1/%	11.30	7.35	8.40	9.02
误差 2/%	4.00	4.45	7.40	5.28

注：误差 1=（手动提取值−实测结构面值）/实测结构面值；误差 2=（自动识别值−实测结构面值）/实测结构面值。

5　结　论

（1）采用钻孔摄像技术能够呈现钻孔内结构面的形态特征，通过基于钻孔摄像技术的岩体结构面参数获取方法能够较为精确地识别结构面参数。

（2）自适应中值滤波算法能够有效地降低因环境影响导致的图像噪声，减少钻孔图像中的噪声信息。

（3）在钻孔图像处理中，采用改进的方差法进行图像分割，其效果优于采用梯度算子法和最大类间方差法进行的图像分割效果。

（4）基于钻孔摄像技术的改进参数提取方法在识别结构面参数方面具有可行性和准确性，且准确性高于传统的提取方法。

参 考 文 献

[1] 黄润秋, 许模, 陈剑平, 等. 复杂岩体结构精细描述及其工程应用[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
HUANG Run-qiu, XU Mo, CHEN Jian-ping. Fine description of complex rock mass structure and its engineering application[M]. Beijing: Science Press, 2004.

[2] 钟登华, 李明超, 杨建敏. 复杂工程岩体结构三维可视化够造及其应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(4): 575－580.
ZHONG Deng-hua, LI Ming-chao, YANG Jian-min. Three dimensional visualization of complex engineering rock mass structure and its application[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 24(4): 575－580.

[3] 王川婴, K Tim LAW. 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, K Tim LAW. Development and present situation of borehole camera technology[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 24(19): 3440－3448.

[4] 胡骞. 基于钻孔摄像的岩体结构面判读方法研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2013.
HU Qian. Study on interpretation method of rock structure surface based on borehole camera technology[D]. Beijing: University of the Chinese Academy of Sciences, 2013.

[5] PRENSKY S E. Advances in borehole imaging technology and application[C]//Borehole Imaging: Applications and Case Histories. London: Geological Society, 1999: 1－43.

[6] WILLIAMS J H, JOHNSON C D. Acoustic and optical borehole-wall imaging for fractured-rock aquifer studies[J]. **Journal of Applied Geophysics**, 2004, 55(1): 151－159.

[7] 韩增强, 王川婴, 施华堂, 等. 空间坐标系下地下岩体结构面数学描述方法初探[J]. 岩土力学, 2016, 37(增刊 2): 410－414.
HAN Zeng-qiang, WANG Chuan-ying, SHI Hua-tang, et al. Discussion on mathematical description method of discontinuities in underground rock based on spatial coordinate system[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2016，37(Supp. 2): 410－414.

[8] 汪进超, 王川婴, 胡胜, 等. 全景钻孔摄像技术勘测精度分析[J]. 岩石力学与工程学报，2015, 34(增刊 2): 4038－4046.
WANG Jin-chao, WANG Chuan-ying, HU Sheng, et al. Survey precision analysis of panoramic borehole camera technology[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2015, 34(Supp. 2): 4038－4046.

[9] 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 technology and digital borehole[J]. **Underground Space**, 2001, 21(4): 254－261.

[10] 张铮, 徐超, 任淑霞, 等. 数字图像处理与机器视觉[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2014: 139－144.

ZHANG Zheng, XU Chao, REN Shu-xia, et al. Digital image processing and machine vision[M]. Beijing: People's Posts and Telecommunications Press, 2014: 139－144.

[11] 陈文静, 蔡小舒, 陈孝震, 等. 基于HSV空间的岩心图像处理[J]. 中国粉体技术, 2013, (2): 1－6.
CHEN Wen-jing, CAI Xiao-shu, CHEN Xiao-zhen, et al. Core image segmentation algorithm based on HSV space[J]. **China Powder Science and Technology**, 2013, (2): 1－6.

[12] YU S N, JANG J H, HAN C S. Auto inspection system using a mobile robot for detecting concrete cracks in a tunnel[J]. **Automation in Construction**, 2007, 16(3): 255－261.

[13] 王睿, 漆泰岳, 雷波, 等. 隧道衬砌裂缝特征提取方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(6): 1211－1217.
WANG Rui, QI Tai-yue, LEI Bo, et al. Characteristic extraction of cracks of tunnel lining[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2015, 34(6): 1211－1217.

[14] 陈佳娟, 陈晓光, 纪寿文. 基于遗传算法的图像模糊增强处理方法[J]. 计算机工程与应用, 2001, 21: 109－111.
CHEN Jia-juan, CHEN Xiao-guang, JI Shou-wen. Image fuzzy enhancement processing method based on genetic algorithm[J]. **Computer Engineering and Applications**, 2001, 21: 109－111.

[15] 汪亚明, 吴国忠, 赵匀. 基于模糊上级遗传算法的图像增强技术[J]. 农业机械学报, 2003, 34(3): 96－98.
WANG Ya-ming, WU Guo-zhong, ZHAO Yun. Image enhancement based on fuzzy superior genetic algorithm[J]. **Chinese Journal of Agricultural Machinery**, 2003, 34(3): 96－98.

[16] 杨必武, 郭晓松, 王克军, 等. 基于直方图的线性拉伸的红外图像增强新算法[J]. 红外与激光工程, 2003, 32(1): 1－7.
YANG Bi-wu, GUO Xiao-song, WANG Ke-jun, et al. A new infrared image enhancement algorithm based on histogram of linear stretching[J]. **Infrared and Laser Engineering**, 2003, 32(1): 1－7.

[17] ZHANG D, WANG Z. Impulse noise detection and removal using fuzzy techniques[J]. **IEEE Electronics**, 1997, 33(5): 378－379.

[18] 赵春燕, 郑永果, 王向葵. 基于直方图的图像模糊增强算法[J]. 计算机工程, 2005, 31(12): 185－186.
ZHAO Chun-yan, ZHENG Yong-guo, WANG Xiang-kui. Image fuzzy enhancement algorithm based on histogram[J]. **Computer Engineering**, 2005, 31(12): 185－186.

上接第 3052 页

[7] 范文, 俞茂宏, 孙萍, 等. 硐室形变围岩压力弹塑性分析的统一解[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2003, 23(3): 1－4.
FAN Wen, YU Mao-hong, SUN Ping, et al. Unified solution of elastic-plastic analysis for surrounding rock mass stress under cave deformation[J]. **Journal of Chang'an University (Natural Science Edition)**, 2003, 23(3): 1－4.

[8] 曾开华, 鞠海燕, 张常光. 深埋圆形隧道弹塑性位移统一解及其比较分析[J]. 岩土力学, 2011, 32(5): 1315－1319.
ZENG Kai-hua, JU Hai-yan, ZHANG Chang-guang. Elastoplastic unified solution for displacements around a deep circular tunnel and its comparative analysis[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2011, 32(5): 1315－1319.

[9] 陈立伟, 彭建兵, 范文, 等. 基于统一强度理论的非均匀应力场圆形巷道围岩塑性区分析[J]. 煤炭学报, 2007, 32(1): 20－23.
CHEN Li-wei, PENG Jian-bing, FAN Wen, et al. Analysis of surrounding rock mass plastic zone of round tunnel under non-uniform stress field based on the unified strength theory[J]. **Journal of China Coal Society**, 2007, 32(1): 20－23.

[10] 彭瑞, 孟祥瑞, 赵光明, 等. 基于增量型本构关系的深埋巷道开挖面附近围岩统一解[J]. 中国矿业大学学报, 2015, 44(3): 444－452.
PENG Rui, MENG Xiang-rui, ZHAO Guang-ming, et al. Surrounding rock unified solution near deep-buried roadway excavation work face considering incremental constitutive relationship[J]. **Journal of China University of Mining & Technology**, 2015, 44(3): 444－452.