

DOI :10.3876/j.issn.1000-1980.2009.01.019

岩土材料微结构图像预处理方法

胡 昕^{1,2},洪宝宁¹,孙 秋³,王 伟⁴

(1.河海大学岩土工程科学研究所,江苏 南京 210098 2.中国电力工程顾问集团西北电力设计院,西安 710065;
3.南京市公路管理处公路科学研究所,江苏 南京 210012;4.南京工程学院建筑工程学院,江苏 南京 211167)

摘要:为提高岩土材料微结构特征参数提取的准确性和完整性,运用小波变换的多分辨率技术提取并重组了同组图像序列中的清晰部分,进而得到了高清晰度的图像,随后对 3 种常用的阈值分割方法在岩土材料微结构图像预处理中的适用性进行了对比分析.结果表明,利用小波变换的多分辨率技术重组岩土材料微结构图像,能够有效增大图像信噪比,减小灰度方差,优化微结构数字图像的质量.应用平均灰度法和最大方差自动取阈法处理岩土材料微结构图像,能够有效分割图像并保证特征参数提取的完整性.

关键词:岩土材料 微结构 图像融合 图像分割 多分辨率技术

中图分类号: TU411.92 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1980(2009)01-0091-05

岩土材料的工程特性在很大程度上受到其内部微结构的系统状态及其整体行为的控制,复杂的物理力学性质是其微结构特性的集中体现^[1-5].因此,对岩土材料微结构的研究十分必要.微结构研究的发展水平与观测技术密切相关,要揭示岩土材料工程特性与微结构的内在联系,必须不断更新微结构的观测技术.目前,绝大多数试验方法都不能连续观测岩土材料在荷载作用下微结构的变化,无法得到颗粒和孔隙的实际变形和位移信息,因而难以在微结构真实演变的基础上建立土体受力模型及本构关系,制约了相关理论的进一步发展^[1-2].为了克服上述缺点,河海大学岩土工程研究所微结构实验室自行开发了岩土微结构光学测试系统^[2,6-7].但是,经该测试系统采集的土体微结构图像,由于光照不均匀,土中水分反射光源形成高频噪点,土样放大倍数与景深之间出现矛盾,采集的图像数字信息丢失、缺损,部分区域模糊,对微结构定量参数的提取带来许多不利影响.因此,需要采用小波变换、亮度和对比度调节、空间滤波处理^[7-8]、图像分割等有效的数字图像处理技术对采集的原始图像进行前期处理,提高土体微结构图像的质量,以便准确提取结构特征参数.本文主要采用图像融合和图像分割技术来提高原始图像的质量.

1 图像融合

土样新鲜断面不平整会使拍摄的图像出现景深现象,即随着放大倍数的增加,图像中部分区域清晰,部分区域模糊.所拍摄的图像不能如实反映土体的原始结构,就无法准确提取结构特征参数.为了解决这一问题,本文利用小波变换的多分辨率技术提取每幅图像中的清晰部分,然后将所有清晰部分重组成一幅完整的图像,从而提高了获取结构特征参数的精度和可靠性.

1.1 基本思路

小波变换的基本思想是用一族函数去表示或逼近一个信号,这一族函数将形成小波函数系.小波是一衰减的波形,它在有限的区域里存在(不为零),且其均值为零.小波变换就是通过这一基本小波函数不同尺度的平移和伸缩实现的^[9].图像处理主要是将图像中的各个像素点在不同状态下的灰度变化规定为信号改变.具体步骤如下:

a. 将图像进行二维小波变换分解(本文选择的分解层数为 3 层),可得到图像的低频分量、水平高频分

收稿日期:2007-05-18
基金项目:国家自然科学基金(50279008)
作者简介:胡昕(1979—),男,新疆阿勒泰人,博士,主要从事岩土体微结构力学及其测试方法和软土地基处理研究.

量、垂直高频分量和对角分量,如图 1 所示.其中: C_3 为图像的低频分量,对应其整体信息; $D_j^k(j=1,2,\cdots,n;k=h,v,d)$ 为图像的水平、垂直与对角分量,分别对应其细节信息.

b. 在 2 幅图像的小波变换域内,分别对分量 k 在不同分解尺度 j 上的高频系数进行比较,把对应位置上绝对值较大的系数作为重要小波系数保留下来:

$$\hat{w}_{j,k} = \begin{cases} w_{j,k}^1, \text{abs}(w_{j,k}^1) > \text{abs}(w_{j,k}^2) \\ w_{j,k}^2, \text{abs}(w_{j,k}^1) \leq \text{abs}(w_{j,k}^2) \end{cases} \quad (1)$$

式中 $w_{j,k}^1$ 和 $w_{j,k}^2$ 分别表示 2 幅图像在各尺度 j 和各分量 k 上的小波系数.

c. 处理 2 幅图像经小波变换的逼近系数 $\hat{C}_3$ 和 $\hat{C}_3$. 图像模糊表示其细节信息(或高频信息)丢失较多,而整体信息(或低频信息)保持较好.然而,土体微结构研究主要针对整幅图像,因此取整体信息保持最好的逼近系数作为 2 幅图像融合之后的逼近系数 $\hat{C}_3$,在加强细节信息的同时,不会削弱整体信息.

$$\hat{C}_3 = \begin{cases} \hat{C}_3^1 & (\hat{C}_3^1 > \hat{C}_3^2) \\ \hat{C}_3^2 & (\hat{C}_3^1 \leq \hat{C}_3^2) \end{cases} \quad (2)$$

d. 将得到的全部小波系数 $\hat{w}_{j,k}$ 和逼近系数 $\hat{C}_3$ 进行二维小波反变换,便可获得融合后的图像.

1.2 处理效果分析

1.2.1 试验方法

在同一荷载作用下,针对土体同一区域,首先拍摄初始聚焦点图像 I_0 ,然后沿 Z 轴方向,每隔一定的步距 $d_i(i=1,2,\cdots,n)$ 驱动控制台 Z 轴上的步进电机,使之带动控制台上的显微镜头移动.利用 CCD 拍摄不同聚焦点处的土体微结构图像序列 $I_i(i=1,2,\cdots,n)$,同时记录下总的步距数 $D = \sum_{i=1}^n d_i$. 将图像存入计算机后,再反向驱动 Z 轴上的步进电机回到第 1 个聚焦点处.然后施加荷载,并重复上述工作,直至整个试验结束.

1.2.2 处理结果

选取同一荷载作用下土体同一区域的 2 幅原始图像,见图 2. 用 1.2.1 的方法进行图像融合,得到融合后的图像,如图 3 所示.为验证采用上述方法融合图像的可靠性,本文还运用 Photoshop 方法处理出了相应的图像,如图 4 所示.

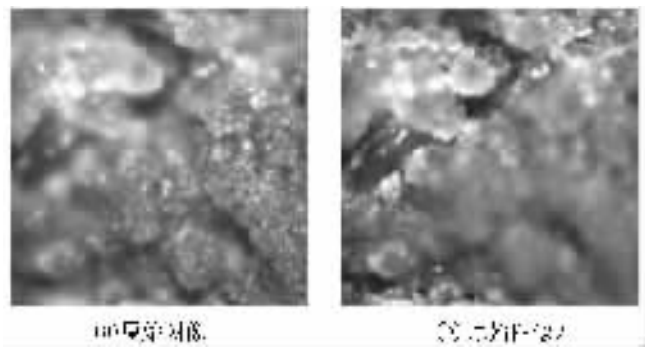


图 2 融合前的原始图像序列

Fig. 2 Original array before image fusion

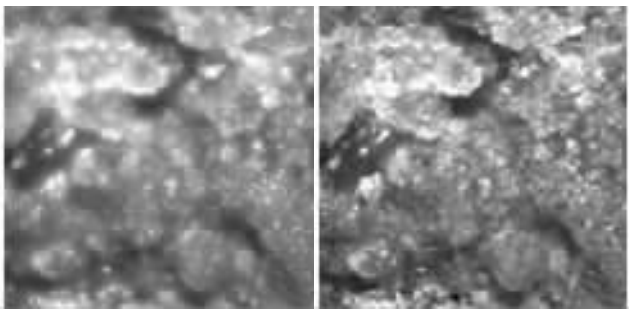


图 3 小波法得到的融合图像

Fig. 3 Images fused by wavelet transform

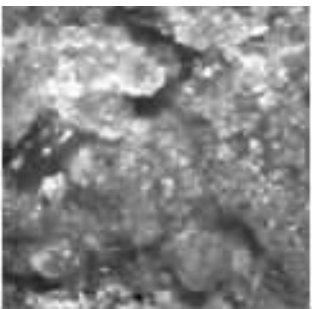


图 4 Photoshop 处理得到的图像

Fig. 4 Image processed by Photoshop

1.2.3 结果可靠性分析

1.2.3.1 信噪比和均方差比较

相比 Photoshop 处理的图像,融合后的图像更加自然,不会出现拼接痕迹.从定量角度来判定其效果,把图像的模糊块看作是噪声干扰,提出 2 种评价函数:信噪比和均方差.因为没有标准的参考图,选取利用

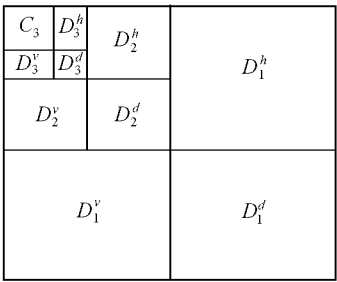


图 1 图像的 3 层小波分解示意图

Fig. 1 Decomposition of images by wavelet transform

Photoshop处理的图像作为评判的标准参考图. 设大小为 $M \times N$ 的参考图像为 $f(x, y)$, 含有噪声的图像为 $f'(x, y)$, 则含噪图像的信噪比 R_{SN} 定义为

$$R_{\text{SN}} = 10\lg(A/B)$$

(3)

含噪图像的均方差 s 定义为

$$s = \frac{B}{MN}$$

(4)

$$A = \sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N (f - \bar{f})^2 \quad B = \sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N (f - f')^2$$

式中 $\bar{f}$ 表示参考图像 $f(x, y)$ 的均值.

利用式(3),(4)分别计算出图 2 和图 3 图像的信噪比和均方差,如表 1 所示.从表 1 可以看出,融合后的图像信噪比增大,灰度方差减小,质量较高,有利于结构特征参数的提取,保证了数据的可靠性.

1.2.3.2 结构参数比较

因为没有标准的参考图,仍然选取用 Photoshop 处理的图像作为评判的标准参考图.将图 2~4 用 Geoimage 程序提取结构参数,结果见表 2.

表 1 图像的信噪比和均方差

Table 1 Signal-to-noise ratio and gray scale variance of images

图 像	R_{SN}	s
图 2(a)	8.249 3	312.061 8
图 2(b)	8.079 9	324.414 4
图 3	8.731 7	279.251 6

表 2 图像融合前后和 Photoshop 处理的结构参数

Table 2 Characteristic parameters of images by wavelet transform and Photoshop

图 像	平均灰度	熵	面积比例/%		定向度		分布分维		颗粒圆度	欧拉数
			颗粒	孔隙	颗粒	孔隙	颗粒	孔隙		
图 2(a)	134	7.30	57.49	42.34	0.71	0.58	1.67	1.60	0.33	0.43
图 2(b)	131	7.36	57.01	42.85	0.71	0.58	1.67	1.61	0.32	0.43
图 3	135	7.39	53.10	46.66	0.67	0.62	1.65	1.62	0.43	0.47
图 4	133	7.42	53.99	45.76	0.68	0.62	1.66	1.62	0.46	0.46

从表 2 可以看出,融合后的图像的结构参数和 Photoshop 处理的相比,差别不大.这种差别存在的原因:仅用 2 幅图融合,还是有部分区域模糊;Photoshop 处理的图像有拼接痕迹,二值化后,拼接处的颗粒或孔隙形态无法准确表现.可驱动步进电机针对同一区域采集多幅图像并进行融合,以达到缩小模糊区域的范围、提高准确度的目的.

由上述对比可知,融合后的图像,信噪比增大,灰度方差减小,结构参数与 Photoshop 处理的相近.因此,本文主要采用图像融合技术预处理图像,以解决景深和放大倍数的问题.

2 图 像 分 割

图像分割是岩土材料微结构图像处理和结构特征参数提取前的重要步骤之一.图像分割是指将图像分割成具有特殊含义的不同区域,本质上是将各像素进行分类的过程^[10-11].针对岩土材料微结构的特点,图像分割是利用颗粒、孔隙和联结带像素灰度大小和分布的不同,分割出孔隙、颗粒和联结带.图像中区域的范围常常是模糊的,因此如何选取阈值便成为区域分割中的关键问题.考虑到联结带界定较为困难,本文仅通过选取阈值分割颗粒和孔隙.阈值 θ 可由计算机自动选取,也可人为选定.考虑到岩土材料微结构图像的特点,本文主要探讨平均灰度法和最大方差自动取阈法的适用性.

2.1 基本原理

2.1.1 平均灰度法

平均灰度法以图像中所有像素灰度值的平均值作为阈值对图像进行分割,灰度均值

$$\mu = \sum_{i=0}^{767} \sum_{j=0}^{575} \frac{U_{i,j}}{768 \times 576}$$

(5)

式中 $U_{i,j}$ 为第 i 行第 j 列像素点的灰度值.

2.1.2 最大方差自动取阈法

最大方差自动取阈法的基本做法是把双峰直方图一分为二,并使被分开的 2 部分之间的方差最大.该法

设 t 为分割区域的阈值,统计图像的灰度直方图得到被 t 分离后的孔隙面积比例 θ_1 、颗粒面积比例 θ_2 、整幅图像的平均灰度 μ 、孔隙的平均灰度 μ_1 和颗粒的平均灰度 μ_2 ,则整幅图像的平均灰度与颗粒、孔隙和联结带的平均灰度间的关系为

$$\mu = \mu_1\theta_1 + \mu_2\theta_2$$

(6)

同一区域间常常有灰度相似性,而不同区域间则表现为明显的灰度差异.当被阈值 t 分离的两区域间的灰度差较大时,两区域的平均灰度与整幅图像平均灰度之差也较大,区域间的方差 $\sigma^2(t)$ 就是描述这种差异的有效参数,其表达式为

$$\sigma^2(t) = \theta_1(\mu_1 - \mu)^2 + \theta_2(\mu_2 - \mu)^2$$

(7)

式(7)表示图像被阈值 t 分割后 2 个区域之间的方差.式中 $\mu_1, \mu_2, \theta_1, \theta_2, \mu$ 都是 t 的函数,可采用多元函数求极值的方法得到使方差 $\sigma^2(t)$ 最大时的 t .

2.2 结果比较

为研究阈值选取对结构特征参数提取的影响并验证上述 2 种方法对于岩土材料微结构图像分割的可靠性,本文对某幅图像进行了不同阈值的分割处理(图 5).考虑该图像的平均灰度为 108,人为选取阈值为 70, 90, 120, 140, 160 并分别进行分割,同时进行平均灰度法、最大方差自动取阈法分割.从图 5 可以看出:(a)平均灰度法和最大方差自动取阈法处理后的图像,其颗粒和孔隙形态比较接近原始图像.(b)人为选取阈值分割后图像的孔隙和颗粒分布与原始图像差别较大.(c)阈值越小,孔隙所占面积就越小,孔隙被分割为许多细小独立的多边形.阈值越大,孔隙越大,孔隙连成一片并组成单一多边形.

用 Geoimage 软件提取不同阈值分割处理后图像的结构特征参数见表 3.从表 3 可以发现:(a)选取不同

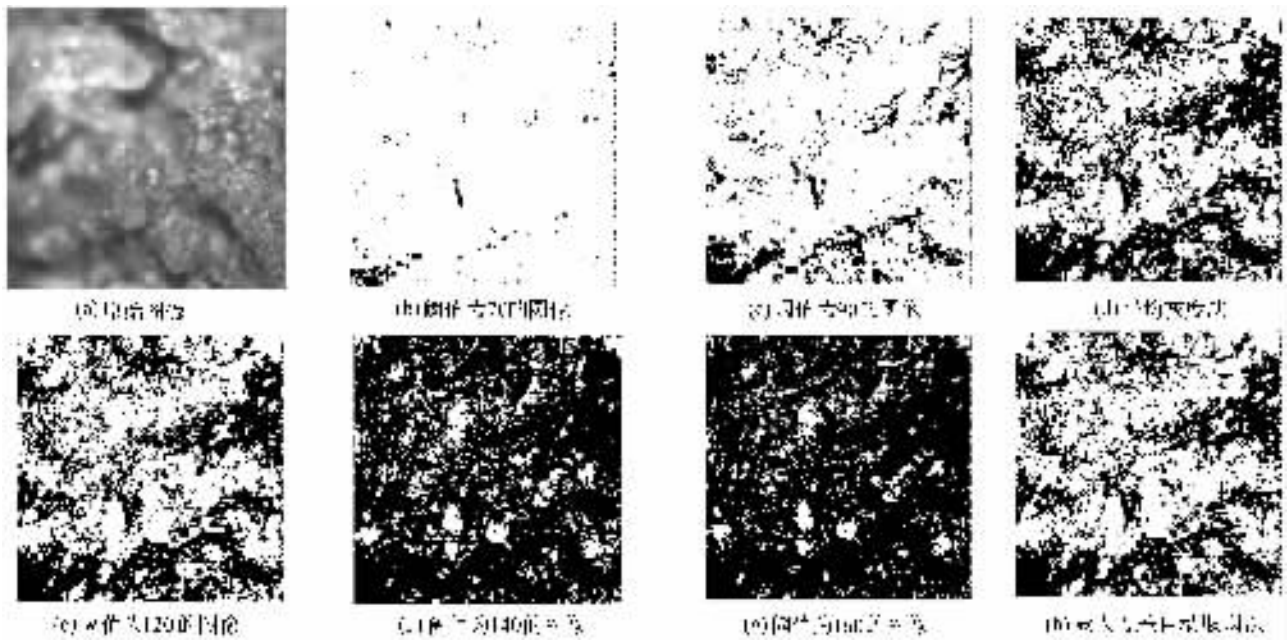


图 5 不同阈值分割结果

Fig. 5 Images segmented by different thresholds

表 3 不同阈值分割处理后图像的结构参数

Table 3 Characteristic parameters of images segmented by different thresholds

阈值选取方法	面积比例/%		定向度		分布分维		颗粒圆度	欧拉数
	颗粒	孔隙	颗粒	孔隙	颗粒	孔隙		
选取阈值为 70	97.61	2.39	0.99	0.06	1.77	0.65	0.02	0.02
选取阈值为 90	85.57	14.43	0.92	0.27	1.74	1.01	0.13	0.14
选取阈值为 120	39.56	60.44	0.57	0.75	1.53	1.65	0.55	0.62
选取阈值为 140	19.19	80.81	0.34	0.89	1.24	1.73	0.80	0.83
选取阈值为 160	13.70	86.30	0.27	0.92	1.12	1.75	0.88	0.89
最大方差自动取阈法	58.04	41.96	0.72	0.58	1.64	1.54	0.36	0.42
平均灰度法	54.69	43.31	0.7	0.62	1.63	1.56	0.39	0.46

的阈值对结构参数的提取影响非常显著.人为选定的阈值增大,颗粒面积、颗粒定向度、颗粒分布分维、颗粒圆度和欧拉数减小,孔隙面积、孔隙定向度、孔隙分布分维增大;(b)平均灰度法和最大方差自动取阈值处理后图像的结构特征参数相近,与原始图像相符.

3 结 语

为提高土体微结构图像的质量,并准确提取微结构量化参数,本文采用数字图像处理技术从图像融合和图像分割角度对采集的原始图像进行了优化,并得到了以下结论:

- a. 利用小波变换的多分辨率技术对岩土材料微结构图像序列进行预处理,能够有效增大图像信噪比以及减小灰度方差,优化了微结构数字图像的质量.
- b. 平均灰度法和最大方差自动取阈值处理后图像的结构特征参数相近,与原始图像相符.

参考文献:

[1] 胡瑞林,李向全,官国琳,等.黏性土微观结构定量模型及其工程地质特征研究[M].北京:地质出版社,1995.
[2] 胡昕,洪宝宁,周宇泉,等.三轴压缩条件下黏性土微结构随荷载变化动态调整的定量研究[J].四川大学学报:工程科学版,2006,38(6):57-62.
[3] 胡昕,洪宝宁,周宇泉.三轴应力下黏性土的微结构及其演化规律[J].中国铁道科学,2007,28(3):6-11.
[4] 胡昕,孙秋,洪宝宁,等.某黏性土压缩性与微结构形态之间关系的研究[J].工程勘察,2006(11):22-24,40.
[5] 孙秋,胡昕,闵紫超,等.单轴应力下水泥土微观结构的演化特性[J].河海大学学报:自然科学版,2007,35(1):59-62.
[6] 刘敬辉,洪宝宁,张海波.土体微结构变化过程的试验研究方法[J].岩土力学,2003,24(5):744-747.
[7] 刘敬辉.岩土体微结构定量分析及试验方法研究[D].南京:河海大学,2003.
[8] 周宇泉.加载过程中黏性土微结构变化规律的定量试验研究[D].南京:河海大学,2005.
[9] 何锦平.基于小波多分辨率分析的图像增强及其应用研究[D].西安:西北工业大学,2003.
[10] 陈晓梅.表面粗糙度干涉图像处理中的阈值优选[J].光学学报,1994,14(11):1183-1186.
[11] 王强,马利庄.图像二值化时图像特征的保留[J].计算机辅助设计与图形学学报,2000,12(10):746-750.

Preprocessing methods for microstructural images of geomaterials

HU Xin^{1, 2}, HONG Bao-ning¹, SUN Qiu³, WANG Wei⁴

(1. Geotechnical Research Institute, Hohai University, Nanjing 210098, China ;

2. Northwest Electric Power Design Institute, China Power Engineering Consulting Group Corporation, Xi'an 710065, China ;

3. Research Institute of Highway, Nanjing Highway Management Office, Nanjing 210012, China ;

4. Institute of Civil and Engineering Architecture, Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167, China)

Abstract: In order to increase the accuracy and integrality of extracting microstructural characteristic parameters of geomaterials, clear parts of the same image array were extracted and recombined by use of the wavelet multi-resolution technology. Thus the images with high definition were acquired. A comparative analysis for the applicability of 3 frequently used threshold image segmentation methods to process microstructural images of geomaterials was conducted. The results indicate that the recombination of microstructural images of geomaterials by use of the wavelet multi-resolution technology can improve the signal-to-noise ratio of images, reduce the gray scale variance and optimize the microstructural images of geomaterials; the average gray scale method and the automatic threshold extraction method according to the maximum variance to deal with the microstructural images of geomaterials can effectively segment images and ensure the integrality of extracting microstructural characteristic parameters of geomaterials.

Key words: geomaterial ; microstructure ; image fusion ; image segmentation ; multi-resolution technology