

文章编号: 1000-7598 (2009) 10-2903-05

粉质黏土图像的纹理特征分析

徐金明¹, 羌 培¹, 张鹏飞²

(1. 上海大学 土木工程系, 上海 200072; 2. 上海世博土地控股有限公司, 上海 200125)

摘 要: 粉质黏土通常为絮状结构, 难以使用肉眼直接判别出颗粒的形状和大小。将现场拍摄得到的粉质黏土彩色图像转化为灰度图像, 得到了灰度图像灰度直方图的 6 个纹理特征参数 (均值、方差、平滑度、3 阶矩、能量、熵)。在建立灰度共生矩阵的基础上, 得到了像素平面分布关系的 5 个纹理特征参数 (角 2 阶矩、对比度、相关度、逆差矩、熵)。对这些纹理特征参数与粉质黏土传统工程性质指标进行了多元线性回归分析, 得到了相应回归方程。结果表明, 粉质黏土图像的纹理特征参数与传统工程性质具有较好的对应关系, 可以用于快速确定粉质黏土的工程性质指标, 对软土地区岩土工程设计具有一定的参考价值。

关 键 词: 粉质黏土; 纹理; 图像分析; 直方图; 灰度共生矩阵; 多元线性回归分析

中图分类号: TU 411.2

文献标识码: A

Texture analysis of photographs of silty clay

XU Jin-ming¹, QIANG Pei¹, ZHANG Peng-fei²

(1. Department of Civil Engineering, Shanghai University, Shanghai 200072, China; 2. Shanghai World EXPO Land Holding Co., Ltd., Shanghai 200125, China)

Abstract: Silty clay is a typical soft soil and characterized with its coagulation structure. In the field, it is very difficult to directly determine the shape and size of a grain in the silty clay by eyes. Some colorful photographs of the silty clay were captured by a commercial camera and transformed into grayscale images. To these grayscale images, the six histogram-based parameters, including mean, standard deviation, smoothness, third order moment, energy and entropy, were thereafter obtained. Considering the spatial relations of grayscale intensity in an image, five parameters, including angularity second order moment, contrast, correlation, inverse difference moment and entropy, are also obtained based on a gray co-occurrence matrix. Furthermore, the regression technique was used to estimate the relations between the texture parameters and the traditional engineering properties of silty clays. It is shown that these relations are much satisfactory and may be used in quickly examining the engineering properties of silty clay. The method developed is referable to the geotechnical design in soft grounds.

Key words: silty clay; texture; image analysis; histogram; gray co-occurrence matrix; multiple linear regression

1 引 言

由于粉质黏土通常为絮状结构, 难以用肉眼直接判别出颗粒的形状和大小, 岩土工程勘察时通常借助小刀划痕、手感情况对粉质黏土进行分类和命名。粉质黏土的工程性质如物理性质、水理性质、力学性质等指标, 要在室内土工试验结束后, 根据试验成果及地区经验进行统计分析和综合确定。而室内土工试验都需要大量的时间和费用, 若能在现场勘察时尽快估计这些指标大小 (范围), 对工程建设将具有重要意义。本文根据勘察现场拍摄得到的

粉质黏土照片, 使用数字图像处理中的纹理特征分析方法, 对粉质黏土工程性质指标进行初步估计。

数字图像纹理特征分析在模式识别、信号处理、遥感图片解译、医学图像分析等方面得到了广泛应用 (如 Tuominen 和 Pekkarinen^[1]所做的工作), 近年来岩土工程及相关领域也有一些文献介绍图像及其纹理特征分析方法的应用, Wang^[2]基于灰度共生矩阵的 9 个参数、空间结构关系的 9 个参数、频谱特征的 11 个参数, 对 6 类岩石进行了研究。李元海等^[3]使用数码相机获得模型试验图像序列, 通过布置多对测点线与图像相关性分析来识别变形剪切

收稿日期: 2008-01-10

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 40572162); 上海市教委科技创新项目 (No. 09YZ39) 资助。

第一作者简介: 徐金明, 男, 1963 年生, 教授, 主要从事岩土工程与工程地质的教学科研工作。E-mail: xjming@163.com

带的位置、形状与边界点。李晓军等^[4]使用数字图像技术，识别三轴试验中土样表面橡皮膜标志线、测试土样径向变形和轴向变形，并得到了土的本构模型参数。唐玮等^[5]将分形特征与灰度共生矩阵结合起来描述断口图像的纹理特征。彭光雄等^[6]采用灰度共生矩阵及相应的 4 个统计量，提取了卫星照片的纹理信息。陆秀峰等^[7]根据混凝土骨料截面信息测量数据和机械筛分试验结果，提出了基于数字图像分析的骨料粒径分布估计方法。邵龙潭等^[8]利用计算机层析图像识别技术、图像三值化和边界提取技术，确定了沥青混合料中空隙、胶浆和集料三种组分的灰度信息与实际位置。尹小涛等^[9]利用计算机层析成像技术，检测疑似裂纹区并确定了裂纹长度和宽度等几何参数。陈海洋等^[10]对三维视频显微观测仪得到的钙质砂显微照片进行数字化处理，用统计分形维数来定量描述颗粒投影轮廓线凹凸程度与颗粒形状。徐金明等^[11]使用边缘检测技术，确定了岩石中的流体包裹体分布。

本文以上海某工程第 5 层粉质黏土图像为例，将粉质黏土彩色图像转化为灰度图像后得到相应灰度直方图和灰度共生矩阵的 11 个纹理特征参数，选取 6 个参数与传统工程性质指标进行多元线性回归分析。

2 方 法

图像纹理是指图像中的局部模式和排列规则，体现在图像灰度级或颜色的变化，这种变化与空间统计特征密切相关。目前常用的纹理特征分析包括：使用灰度（亮度）直方图统计图像像素灰度级的分布情况；使用灰度共生矩阵统计图像像素灰度级的空间关系；将图像进行 Fourier 变换在其频率域抽取特征量，以及结构分析等方法。本次研究采用前两种方法。

2.1 原始图像

原始图像为现场勘察条件下拍摄得到的 JPEG 格式粉质黏土彩色图像，其大小为 $M \times N \times 3$ 像素（ M 和 N 为整数，本次研究中 M 和 N 分别为 1 944 和 2 592）。为了后续处理方便，首先将彩色图像转化为灰度级为 0~255 的灰度图像，相应的灰度函数 $f(k_1, k_2)$ ^[12]为

$$f(k_1, k_2) = \begin{bmatrix} a(1,1) & a(1,2) & \dots & a(1, K_2) \\ a(2,1) & a(2,2) & \dots & a(2, K_2) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a(K_1,1) & a(K_1,2) & \dots & a(K_1, K_2) \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中： k_1, k_2 为图像中像素点的直角坐标值； $a(k_1, k_2)$ 为位置 (k_1, k_2) 处的灰度值， $k_1 = 1, 2, \dots, K_1$ ， $k_2 = 1, 2, \dots, K_2$ 。

考虑到印刷质量与篇幅所限，这里不列出全部原始彩色图像，只绘出原始彩色图像转化后的一幅典型灰度图像，见图 1。



图 1 典型粉质黏土的灰度图像
Fig.1 Gray image of a typical silty clay

图 1 的灰度级分布直方图见图 2，对应的灰度矩阵为

$$f(x, y) = \begin{bmatrix} 80 & 79 & \dots & 80 \\ 75 & 74 & \dots & 79 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 81 & 80 & \dots & 66 \end{bmatrix} \quad (2)$$

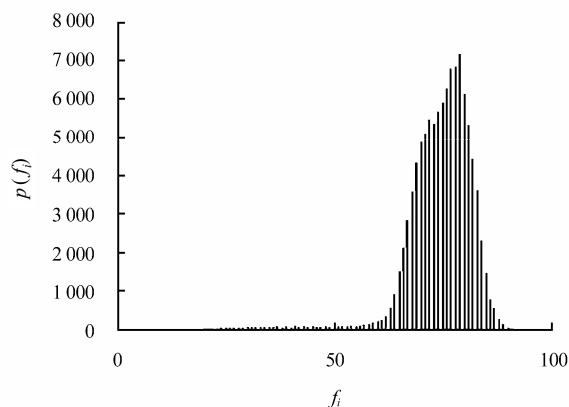


图 2 典型粉质黏土的灰度级分布直方图
Fig.2 Grayscale histogram of a typical silty clay image

2.2 基于灰度直方图的纹理特征分析

设 L 为图像的总灰度级数， $p(f_i)$ 为对应直方图（图 2）上灰度级 f_i ($i = 0, 1, 2, \dots, L-1$) 的分布密度，则图像纹理特征参数（均值 m 、标准差 s 、平滑度 r 、3 阶矩 l 、一致性 u 和熵 e ）分别说明了图像灰度分布的平均亮度、平均对比度、平滑程度、

直方图倾斜程度、度量一致程度、信息量多少，计算公式^[12]分别为

$$\left. \begin{aligned} m &= \sum_{i=0}^{i=L-1} z_i p(f_i); \quad s = \sqrt{\sum_{i=0}^{i=L-1} (f_i - m)^2 p(f_i)} \\ r &= 1 - 1/(1 + s^2); \quad l = \sum_{i=0}^{i=L-1} (f_i - m)^3 p(f_i) \\ u &= \sum_{i=0}^{i=L-1} p^2(f_i); \quad e = - \sum_{i=0}^{i=L-1} p(f_i) \lg_2 p(f_i) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

典型粉质黏土图像（图 1）的特征参数分别为：
 $m = 109.873$, $s = 21.411$, $r = 0.007$, $l = -0.265$,
 $u = 0.020$, $e = 6.130$ 。

2.3 基于灰度共生矩阵的纹理特征分析

由于灰度直方图并不能完整描述图像像素的相对位置信息，下面使用灰度共生矩阵来求取粉质黏土图像的纹理特征参数。

规定某一方向和距离（像素），图像矩阵 f 中灰度为 i 和 j 的两个像素沿该方向和距离同时出现的次数为 $p(i, j)$ ，总像素对为 N ，则 $P = \{p(i, j)/N\}$ 组成的矩阵叫做图像矩阵 f 的共生矩阵 G ，其中 G 的大小为 $N \times N$ ， $i = 1, 2, \dots, N$ ， $j = 1, 2, \dots, N$ 。

基于灰度共生矩阵的纹理特征描述参数主要有角 2 阶矩 g_1 、对比度 g_2 、相关度 g_3 、逆差矩 g_4 、熵 g_5 ，它们反映了不同方向、不同像素距离之间的灰度级关系，计算公式^[13-14]分别为

$$\left. \begin{aligned} g_1 &= \sum_{i=1}^{i=N} \sum_{j=1}^{j=N} p^2(i, j) \\ g_2 &= \sum_{n=1}^{n=N} (i - j)^2 \left[\sum_{i=1}^{i=N} \sum_{j=1}^{j=N} p^2(i, j) \right] \\ g_3 &= \left[\sum_{i=1}^{i=N} \sum_{j=1}^{j=N} ij p(i, j) - \mu_1 \mu_2 \right] / \left[\sigma_1^2 \sigma_2^2 \right] \\ g_4 &= \sum_{i=1}^{i=N} \sum_{j=1}^{j=N} p(i, j) / (i - j)^k, \quad (i \neq j) \\ g_5 &= - \sum_{i=1}^{i=N} \sum_{j=1}^{j=N} p(i, j) \lg_2 p(i, j) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中： $p(i, j)$ 为归一化的灰度共生矩阵元素；

$$\left. \begin{aligned} \mu_1 &= \sum_{i=1}^{i=N} i \sum_{j=1}^{j=N} p(i, j); \quad \sigma_1^2 = \sum_{i=1}^{i=N} (i - \mu_1)^2 \sum_{j=1}^{j=N} p(i, j) \\ \mu_2 &= \sum_{j=1}^{j=N} j \sum_{i=1}^{i=N} p(i, j); \quad \sigma_2^2 = \sum_{j=1}^{j=N} (j - \mu_2)^2 \sum_{i=1}^{i=N} p(i, j) \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

构造灰度共生矩阵时必须预先知道相配对的像素距离和计算方向。这一距离和方向具体选什么数值比较好，数字图像处理技术中还没有统一。图

3 为图 1 中像素间距对纹理特征参数的影响。由图可见，不同像素间距对角 2 阶矩、对比度、逆差矩影响不大，而对相关度和熵影响较大。本文采用白雪冰等^[15]的方法，取像素间距为 4 并采用 0° 、 45° 、 90° 、 135° 这 4 个方向的平均值来构造灰度共生矩阵。图 1 对应的灰度共生矩阵为

$$G = \begin{bmatrix} 2 & 44 & 10 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 47 & 1358 & 779 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 7 & 781 & 99560 & 22 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 22 & 21 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

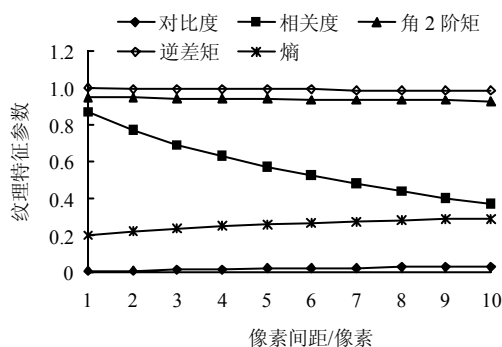


图 3 灰度共生矩阵像素间距对纹理特征参数的影响
 Fig.3 Influences of pixel distances in con-current matrix on texture parameters

根据上述计算方法，粉质黏土典型图像（图 1）灰度共生矩阵的 g_1 、 g_2 、 g_3 、 g_4 、 g_5 分别为 $g_1 = 0.75$ ， $g_2 = 0.05$ ， $g_3 = 0.32$ ， $g_4 = 0.78$ ， $g_5 = 2.50$ 。

2.4 纹理特征参数与工程性质指标关系的多元线性回归分析

对于第 i 幅图像，设图像纹理特征参数为 $\{x_{ij}\}$ ，对应土样的工程性质参数为 $\{y_i\}$ ，现采用多元线性回归分析来确定 $\{x_{ij}\}$ 和 $\{y_i\}$ 之间的关系。假设 $\{y_i\}$ 和 $\{x_{ij}\}$ 构成的回归方程为

$$\{y_i\} = \beta_0 + \{\beta_j x_{ij}\} + \varepsilon_i \quad (7)$$

式中： β_0 为常数； β_j 为回归系数； j 为参与回归分析的工程性质参数个数； ε_i 为随机误差， $i = 1, 2, \dots, n$ ， n 为参与回归分析的图像总数。回归系数 β_j 可以通过最小二乘法求解方程 (7) 得到。

本次研究选取 5 幅图像，将标准差 s 、平滑度 r 、角 2 阶矩 g_1 、对比度 g_2 作为粉质黏土图像 j 的纹理特征参数 $\{x_{ij}\}$ ($j = 1, 2, 3, 4$)，选取孔隙比、塑性

指数、液性指数、黏聚力、内摩擦角、压缩系数作为工程性质参数。由前述方法可以得到黏聚力 c 与图像纹理特征参数的关系为

$$c = -0.34m + 582.48s + 17.01g_1 + 19.38g_2 \quad (8)$$

3 结果和讨论

3.1 结果

表1为上海某工程第5层粉质黏土所摄图像及其主要工程性质指标,表2为各图像的纹理特征参

数,其中图像编号1~4分别取自同一土样。

表1 土工试验成果简表

Table 1 Geotechnical testing results for different silty clays

图像编号	e_0	I_p /%	I_L	c /kPa	φ /(°)	$a_{0.1-0.2}$ /MPa ⁻¹
1	1.23	13.5	1.65	14	21.0	0.93
2	1.23	13.5	1.65	14	21.0	0.93
3	1.22	18.7	1.10	19	10.5	0.83
4	1.22	18.7	1.10	19	10.5	0.83
5	1.08	16.5	0.93	16	14.9	0.63

注:图像3、4为土层中近于粉质黏土的黏土。

表2 粉质黏土图像纹理特征参数

Table 2 Texture characteristics of different photographs

图像编号	m	s	r	l	u	e	g_1	g_2	g_3	g_4	g_5
1	74.8	7.84	0.00	-0.02	0.05	4.67	0.02	0.63	0.94	0.99	0.25
2	84.7	5.27	0.00	-0.00	0.06	4.28	0.06	0.52	0.83	0.97	0.59
3	105.7	23.52	0.01	-0.30	0.02	6.33	0.88	0.04	0.29	0.76	2.68
4	109.9	21.41	0.01	-0.27	0.02	6.13	0.75	0.05	0.32	0.78	2.50
5	45.4	2.94	0.00	0.00	0.09	3.58	0.00	0.00	1.00	1.00	0.01

使用多元线性回归分析得到的图像纹理参数与工程性质指标关系式为

$$\left. \begin{aligned} e_0 &= 0.08m - 217.57s + 0.89g_1 + 0.98g_2, (R^2 = 0.21) \\ I_p &= (1.78s + 0.02g_1 + 0.02g_2) \times 1000, (R^2 = 1.00) \\ I_L &= 0.29m - 710.41s + 0.23g_1 + 0.40g_2, (R^2 = 0.84) \\ c &= -0.34m + 582.38s + 17.01g_1 + 19.38g_2, (R^2 = 0.99) \\ \varphi &= (-6.62s + 0.01g_1) \times 1000, (R^2 = 0.91) \\ a_{0.1-0.2} &= 0.12m - 318.93s + 0.33g_1 + 0.55g_2, (R^2 = 0.74) \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

式中: e_0 为孔隙比; I_p 为塑性指数(%); I_L 为液性指数; c 为黏聚力(kPa); φ 为内摩擦角(°); $a_{0.1-0.2}$ 为压缩系数(MPa⁻¹); R^2 为拟合优度。

3.2 讨论

由表2可以看出,由于图像1和图像2取自同一土样,它们的11个纹理特征参数比较接近。图像3和图像4也有相同的规律,而图像1、3、5取自同一土层的不同土样,它们的11个纹理特征参数相差较大。这些特点说明,本文所述反映粉质黏土的11个纹理特征参数可以较好地反映粉质黏土的工程性质。

由式(9)可以看出,虽然本次研究时所摄粉质黏土图像很少,但所选6个工程性质参数和4个图像纹理特征参数之间的相关性相差较大。孔隙比的拟合优度很低(0.21),压缩系数和液性指数的拟

合优度较低(0.74和0.84),其他3个工程性质参数的拟合优度达到0.91~1.00。

本文选取的粉质黏土图像纹理特征参数和工程性质参数分别为11个和6个,但数字图像处理中所用纹理特征参数个数通常大于11,描述粉质黏土工程性质参数个数也大于6。如果某一地区现场所摄粉质黏土图像足够,使用本文方法可以建立该地区粉质黏土图像纹理特征参数与工程性质参数之间的关系,从而可以方便快速地对粉质黏土的工程性质进行评价。由于粉质黏土与黏土具有类似的工程地质性质,这一方法对黏土工程性质分析也有一定的参考价值。

在建立图像纹理特征参数和工程性质参数关系时,本文选用的是多元线性回归分析方法。实际上,这一方法本身还可以考虑非线性因素(如式(7)中 x_j 使用既有值的组合关系)。同时,各个图像纹理特征参数对不同工程性质参数的贡献应该是不同的,这一区别可以使用主因子分析方法进一步研究。

4 结 语

(1) 本文以上海某工程第5层粉质黏土图像为例,提出了通过数字图像处理纹理特征参数来研究粉质黏土工程性质指标的一种新方法。

(2) 根据数字图像处理技术,由粉质黏土图像获得了基于灰度直方图的6个纹理特征参数和基于

灰度共生矩阵的 5 个纹理特征参数。

(3) 本文选取粉质黏土的 4 个图像纹理特征参数与 6 个工程性质参数进行多元线性回归分析, 得到了相应的回归方程。

(4) 本文提出的粉质黏土纹理特征分析方法对现场快速确定粉质黏土工程性质指标具有一定的参考价值。

参 考 文 献

- [1] TUOMINEN S, PEKKARINEN A. Performance of different spectral and textural aerial photograph features in multi-source forest inventory[J]. **Remote Sensing of Environment**, 2005, 94: 256—268
- [2] WANG L. Automatic identification of rocks in thin sections using texture analysis[J]. **Mathematical Geology**, 1995, 27(7): 847—865.
- [3] 李元海, 靖洪文, 朱合华, 等. 基于图像相关分析的土体剪切带识别方法[J]. **岩土力学**, 2007, 28(3): 522—526.
LI Yuan-hai, JING Hong-wen, ZHU He-hua, et al. A technique of identifying shear band accurately in granular soil using image correlation analysis[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2007, 28(3): 522—526.
- [4] 李晓军, 张金夫, 刘凯年, 等. 基于 CT 图像处理技术的岩土材料有限元模型[J]. **岩土力学**, 2006, 27(8): 1331—1334.
LI Xiao-jun, ZHANG Jin-fu, LIU Kai-nian, et al. Finite element modeling of geomaterial using digital image processing and computerized tomography identification[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2006, 27(8): 1331—1334.
- [5] 唐玮, 朱华, 王勇. 分形和空间灰度共生矩阵联合评价断口形貌研究[J]. **中国矿业大学学报**, 2006, 35(4): 530—534.
TANG Wei, ZHU Hua, WANG Yong. Research on morphology of fracture with combined method of fractal and spatial gray level co-occurrence matrix[J]. **Journal of China University of Mining & Technology**, 2006, 35(4): 530—534.
- [6] 彭光雄, 李京, 何宇华, 等. 利用纹理分析方法提取 CBERS02 星 CCD 图像土地覆盖信息[J]. **遥感技术与应用**, 2007, 22(1): 8—13.
PENG Guang-xiong, LI Jing, HE Yu-hua, et al. Extracting land cover information from CBERS-2's CCD image using texture analysis[J]. **Remote Sensing Technology and Application**, 2007, 22(1): 8—13.
- [7] 陆秀峰, 刘西拉, 覃维祖. 从混凝土二维截面推测骨料粒径分布[J]. **岩石力学与工程学报**, 2005, 24(17): 3107—3112.
LU Xiu-feng, LIU Xi-la, QIN Wei-zu. Estimation of coarse aggregate size distribution from two-dimensional section of concrete[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 24(17): 3107—3112.
- [8] 邵龙潭, 孙益振, 王助贫, 等. 数字图像测量技术在土工三轴试验中的应用研究[J]. **岩土力学**, 2006, 27(1): 29—34.
SHAO Long-tan, SUN Yi-zhen, WANG Zhu-pin, et al. Application of digital image processing technique to triaxial test in soil mechanics[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2006, 27(1): 29—34.
- [9] 尹小涛, 党发宁, 丁卫华, 等. 岩土 CT 图像中裂纹的形态学测量[J]. **岩石力学与工程学报**, 2006, 25(3): 539—544.
YIN Xiao-tao, DANG Fa-ning, DING Wei-hua, et al. Morphologic measurement of crack in CT images of rock and soil[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2006, 25(3): 539—544.
- [10] 陈海洋, 汪稔, 李建国, 等. 钙质砂颗粒的形状分析[J]. **岩土力学**, 2005, 26(9): 1389—1392.
CHEN Hai-yang, WANG Ren, LI Jian-guo, et al. Grain shape analysis of calcareous soil[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2005, 26(9): 1389—1392.
- [11] 徐金明, 赵晓波. 边缘检测技术在确定流体包裹体迹线中的应用[J]. **岩石力学与工程学报**, 2007, 26(6): 1132—1137.
XU Jin-ming, ZHAO Xiao-bo. Determination of fluid inclusion lines using edge-detection technique[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2007, 26(6): 1132—1137.
- [12] GONZALEZ R C, WOODS R E, EDDINS S L. 数字图像处理(MATLAB 版)[M]. 阮秋琦等译. 北京: 电子工业出版社, 2006.
- [13] 李俊山, 李旭辉. 数字图像处理[M]. 北京: 清华大学出版社, 2007.
- [14] 杨淑莹. VC++图像处理程序设计[M]. 北京: 清华大学出版社, 北京交通大学出版社, 2003.
- [15] 白雪冰, 王克奇, 王辉. 基于灰度共生矩阵的木材纹理分类方法的研究[J]. **哈尔滨工业大学学报**, 2005, 37(12): 1667—1670.
BAI Xue-bing, WANG Ke-qi, WANG Hui. Research on the classification of wood texture based on gray level co-occurrence matrix[J]. **Journal of Harbin Institute of Technology**, 2005, 37(12): 1667—1670.