



文章编号:1671-251X(2016)12-0001-05

DOI:10.13272/j.issn.1671-251x.2016.12.001

孙继平,陈浜.基于可控塔式分解系数统计建模的煤岩识别方法[J].工矿自动化,2016,42(12):1-5.

基于可控塔式分解系数统计建模的煤岩识别方法

孙继平¹, 陈浜²

(1. 中国矿业大学(北京), 北京 100083; 2. 中国矿业大学(北京)机电与信息工程学院, 北京 100083)

摘要:针对传统煤岩识别方法易受采煤工艺、煤层赋存条件等因素限制而普适性不强的问题,提出了一种基于可控塔式分解系数统计建模的煤岩识别方法。首先,对煤岩图像进行多尺度可控塔式分解;然后,把非对称广义高斯分布作为一个统计模型去拟合每一个可控方向子带的系数分布,采用最大似然估计法获得非对称广义高斯分布的各参数;最后,以对称的相对熵为距离测度完成煤岩图像的自动辨别。实验结果表明,与现有的其他方法相比,该方法的识别准确率最高,为86.90%。

关键词:煤炭开采;采煤工作面;无人工作面;煤岩识别;可控塔式分解;统计建模;对称相对熵

中图分类号:TD67 文献标志码:A 网络出版时间:2016-12-01 09:28

网络出版地址:<http://www.cnki.net/kcms/detail/32.1627.TP.20161201.0928.001.html>

A coal-rock recognition method based on statistical modeling of steerable pyramidal decomposition coefficients

SUN Jiping¹, CHEN Bang²

(1. China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China; 2. School of Mechanical Electronic and Information Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: For poor universal applicability of traditional coal-rock recognition methods whose application was limited by mining techniques and coal seam conditions, a coal-rock recognition method based on statistical modeling of steerable pyramidal decomposition coefficients was presented. Firstly, multi-scale steerable pyramidal decomposition was conducted on coal and rock images. Then, asymmetric generalized Gaussian distribution was adopted as a statistical model to fit coefficients of every steerable directional subband, and parameters of the asymmetric generalized Gaussian distribution were obtained by means of the maximum-likelihood estimation. Finally, symmetric relative entropy was employed as distance metrics to complete automatic identification of coal and rock images. The experimental results show that the method has high accuracy rate of coal-rock recognition than that of existing ones, which achieves 86.90%.

收稿日期:2016-07-11;修回日期:2016-09-07;责任编辑:李明。

基金项目:国家自然科学基金重点资助项目(51134024);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2010YJ06)。

作者简介:孙继平(1958—),男,山西翼城人,教授,博士,博士研究生导师,中国矿业大学(北京)副校长;获国家科技进步二等奖3项(其中作为第1完成人2项、第2完成人1项);作为第1完成人获省部级科技进步一等奖7项;作为第1完成人主持制定中华人民共和国煤炭行业 and 安全生产行业标准26项;主持制定《煤矿安全规程》第十一章“监控与通信”;作为第1作者或独立完成著作12部;被SCI或EI检索的第1作者或独立完成文章80余篇;作为第1发明人获国家授权发明专利30余项;作为国务院煤矿事故调查专家组组长参加了10起煤矿特别重大事故调查工作;E-mail: sjp@cumtb.edu.cn。

Key words: coal mining; mining working face; unmanned working face; coal-rock recognition; steerable pyramidal decomposition; statistical modeling; symmetric relative entropy

0 引言

国家发展和改革委员会、国家能源局联合印发的《能源技术革命创新行动计划(2016—2030年)》明确指出:到2020年,我国大中型矿区基本实现智能开采,重点煤矿区采煤工作面人数减少一半以上;到2030年,实现智能化开采,重点煤矿区基本实现工作面无人化、工作面巷道集中控制^[1-2]。煤岩自动识别是实现采煤工作面无人化、建设数字矿山的关键技术之一^[3-5],但仍然是一个公开的世界性难题。传统的煤岩识别方法主要有 γ 射线探测法、雷达探测法、声音检测法、红外探测法、截割力检测法等^[4-8],但是这些方法易受采煤工艺、煤层赋存条件等因素限制,其普适性不强。

近年来,随着矿用高清成像、井下视频传输、煤矿物联网等技术的不断发展,越来越多的国内外研究者把目光投向基于图像分析的煤岩识别方法研究。参考文献[9]提出了一种基于双树复小波域统计建模的煤岩识别方法;参考文献[10]采用非对称广义高斯模型对煤岩图像经过小波变换后的高频子带系数进行建模,然后采用相对熵距离测度实现了煤岩识别;参考文献[11]提出了一种离散余弦变换与学习向量量化神经网络相结合的煤岩识别方法;参考文献[12]在小波域中定义了一种纹理导向度,并基于此,利用Minkowski距离测度完成煤岩识别工作;参考文献[13]提出了一种基于图像多小波变换与朴素贝叶斯分类器的煤岩识别方法;参考文献[14]以灰度共生矩阵为基础,采用其能量、熵、惯性矩、相关等统计特征实现煤岩识别;参考文献[15]研究了基于高斯混合聚类的非监督煤岩识别技术;参考文献[16]基于图像空间域,采用灰度阈值法实现了煤岩识别;参考文献[17-18]在计算煤岩图像灰度共生矩阵的基础上,分别采用优选组合特征和聚类显著特征实现了煤岩识别;参考文献[19]分析了煤岩的视觉特性,提出了基于灰度共生矩阵与神经网络的煤岩识别方法。

受参考文献[10]研究思路的启发,笔者提出一种基于可调控塔式分解系数统计建模的煤岩识别方法。首先,对煤岩图像进行可调控塔式分解;然后,对分解得到的每一个可调控方向子带进行关于系数的统计建模;最后,采用以对称相对熵为距离测

度的分类器完成煤岩识别。

1 可调控塔式分解

与多级小波变换类似,可调控塔式分解通过多次递归滤波,能够把数字图像分解成不同尺度和多个方向的子带系列,因此从某种意义上说,可调控塔式分解是经典小波变换的一种特殊变种^[20]。然而,与经典小波变换相比,可调控塔式分解具有平移不变性、方向选择可调控等优势。

可调控塔式分解的基本思想与步骤:①对图像作预处理,即分别经过高通滤波器 $H_0(j\omega)$ 和低通滤波器 $L_0(j\omega)$ 得到高通子带 Subb_{H_0} 和低通子带 Subb_{L_0} ;②在低通子带 Subb_{L_0} 上分别应用代表 D 个可调控方向的带通滤波器组 $\{B_i(j\omega) | i=0, 1, \dots, D-1\}$ 和另一个低通滤波器 $L_1(j\omega)$,得到 D 个中高频方向子带 $\{\text{Subb}_{L_1}^i | i=0, 1, \dots, D-1\}$ 和1个低通子带 Subb_{L_1} ;③对低通子带 Subb_{L_1} 进行行列下采样操作,得到子带 Subb'_{L_1} ,至此完成1个尺度的可调控塔式分解。通过递归迭代执行步骤②—步骤③可完成多尺度可调控塔式分解。

为保证在行列下采样时不发生混叠及递归迭代的顺利进行,在设计可调控塔式分解的各滤波器时应满足以下条件^[21]:

$$L_1(j\omega) = 0, |\omega| > \pi/2 \quad (1)$$

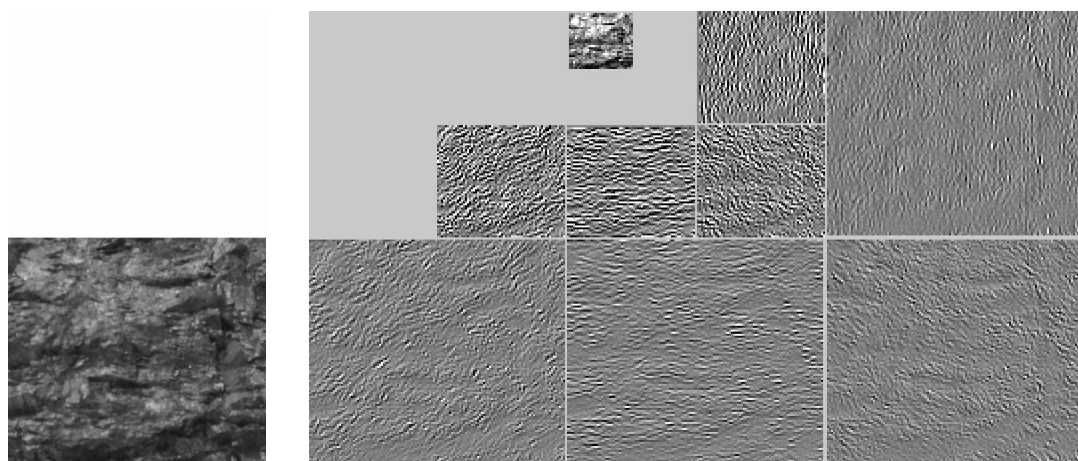
$$|H_0(j\omega)|^2 + |L_0(j\omega)|^2 \left[|L_1(j\omega)|^2 + \sum_{i=0}^{D-1} |B_i(j\omega)|^2 \right] = 1 \quad (2)$$

$$|L_1(j\omega/2)|^2 = |L_1(j\omega/2)|^2 \left[|L_1(j\omega)|^2 + \sum_{i=0}^{D-1} |B_i(j\omega)|^2 \right] \quad (3)$$

煤岩样本图像及其经过可调控塔式分解以后的各子带如图1所示。其中图1(b)为图1(a)所示的1/3焦煤样本图像经过2个尺度、4个可调控方向 $(0, \pi/4, \pi/2, 3\pi/4)$ 的可调控塔式分解以后的各子带。从图1可看出,行列下采样操作只针对 $L_1(j\omega)$ 的滤波结果,对带通滤波器组 $\{B_i(j\omega) | i=0, 1, \dots, D-1\}$ 的滤波结果并没有进行行列下采样。

2 非对称广义高斯分布模型

参考文献[10]已经证实煤岩图像在小波变换后



(a) 1/3 焦煤样本图像

(b) 样本图像可控塔式分解以后的各子带

图1 煤岩样本图像及其经过可控塔式分解以后的各子带

各个方向上的高频子带系数近似地服从非对称广义高斯分布。考虑到小波变换与可控塔式分解的相似之处,建立阈值为0的非对称广义高斯分布模型,其概率密度函数^[10]为

$$f(x; \theta) = \frac{\alpha}{(\beta_L + \beta_R) \Gamma(1/\alpha)} \exp \left[- \left(\frac{|x|}{\beta_x} \right)^\alpha \right] \quad (4)$$

式中: x 为方向子带系数; θ 为该模型的参数集, $\theta = (\alpha, \beta_L, \beta_R)$; α 为形状参数, $\alpha > 0$; β_L, β_R 分别为左尺度参数和右尺度参数, $\beta_L > 0, \beta_R > 0$; 当 $x < 0$ 时, $\beta_x = \beta_L$, 反之 $\beta_x = \beta_R$; $\Gamma(1/\alpha) = \int_0^{+\infty} t^{1/\alpha-1} \times \exp(-t) dt$ 。

采用最大似然估计法计算 θ , 具体推导、计算过程可参照文献[10], 本文不再赘述。

3 煤岩识别分类器设计

目前主流的分类器如最近邻、支持向量机、神经网络等在处理分类任务时, 采用的距离度量以欧氏距离为主。这些分类器假设特征空间是一个欧氏向量空间, 各种特征被直接或间接地组合成向量处理。当特征向量处在非欧几何的流形空间时, 就不能简单地以欧氏距离作为特征相似程度的度量。

在信息论中, 常常采用相对熵来衡量2个概率分布的不同程度^[10]。因此, 通过计算相对熵来评价煤岩测试样本与训练样本的相似程度。子带 X 对子带 X' 的相对熵为^[10]

$$E_R(X, X') = \int_{-\infty}^{+\infty} f(x; \theta) \ln \left[\frac{f(x; \theta)}{f(x; \theta')} \right] dx \quad (5)$$

式中 θ, θ' 分别为 X 和 X' 对应的非对称广义高斯分布模型参数集。

式(5)不满足对称性要求, 即 $E_R(X, X') \neq$

$E_R(X', X)$, 因此采用对称的相对熵, 其定义为

$$E_{RS}(X, X') = \frac{E_R(X, X') + E_R(X', X)}{2} \quad (6)$$

很显然 $E_{RS}(X, X') = E_{RS}(X', X)$ 。训练样本图像与测试样本图像之间的相似度定义为

$$S(I, I') = \sum_{l=1}^L \sum_{i=1}^D E_{RS}(X_{il}, X'_{il}) \quad (7)$$

式中: I, I' 分别为训练样本图像和测试样本图像; L 为可控塔式分解的级数; X_{il}, X'_{il} 分别为 I 和 I' 在经过第 l 级可控塔式分解后的第 i 个方向子带。

$S(I, I')$ 越大, 表明相似度越低, 反之则越高。

4 实验与结果分析

4.1 实验准备

尽管实际生产中同一煤矿或工作面涉及的煤岩种类相对单一, 但是为了更充分地验证基于可控塔式分解系数统计建模的煤岩识别方法的有效性, 笔者所在课题组从河南平顶山煤业集团十矿、河南安阳矿务局龙山煤矿、北京京煤集团木城涧煤矿等地采集了1/3焦煤、贫瘦煤、无烟煤、页岩、砂岩、泥岩等煤岩样本, 如图2所示。实验样本集由1/3焦煤、贫瘦煤、无烟煤、页岩、砂岩和泥岩这6类图像各100幅组成, 合计600幅。样本集中的所有图像均已进行256级灰度化处理, 尺寸统一为 256×224 , 以bmp文件格式存储。

本文实验涉及的所有方法均在 Visual Studio 2008 开发环境下采用 C++ 编程语言实现, 并运行在 Intel Core i5-2450 2.50 GHz CPU、8 GB 内存的 PC 机上。

4.2 不同方法的对比

参与本文对比实验的方法主要有参考文献[9]

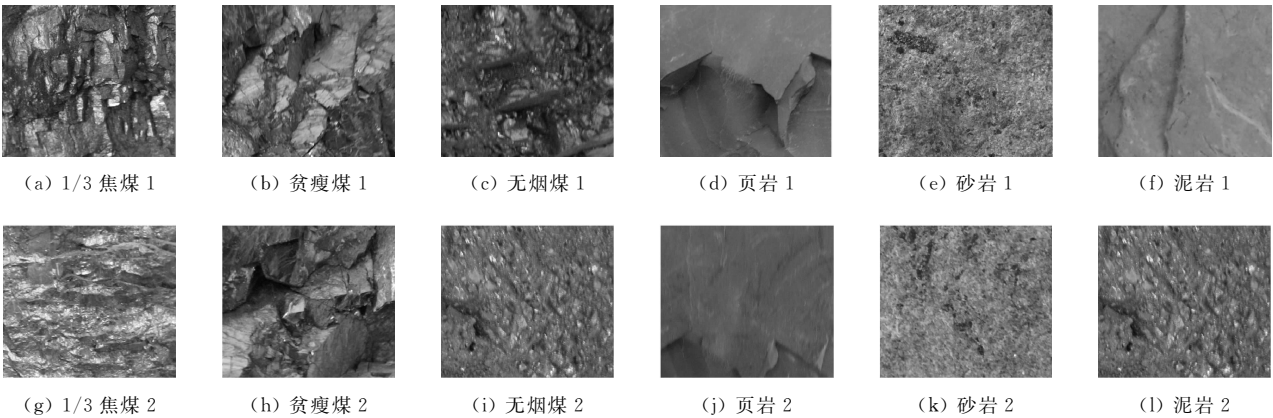


图2 煤岩样本

提出的 DTCWT-GFM 煤岩识别方法,参考文献[10]提出的 WD-AGGM 煤岩识别方法,参考文献[10]中对比实验涉及的 DT-CWT 方法、PWT 方法、Gabor 方法、LBP 方法和 GLCM 方法,以及与本文方法密切相关的 SPD 方法和 SPD-AGGM-ED 方法。SPD 方法直接以煤岩图像在经过可调控塔式分解以后的各方向子带系数绝对值的均值和方差作为判别煤岩的特征。与本文方法一样,SPD-AGGM-ED 方法提取的图像特征是煤岩图像在经过可调控塔式分解后各方向子带在服从非对称广义高斯分布条件下的各参数集 $\theta=(\alpha,\beta_L,\beta_R)$,但是其以欧氏距离作为判断煤岩相似性的定量指标。

为了保证对比实验尽可能公平、无偏见,WD-AGGM 方法、DT-CWT 方法、PWT 方法、Gabor 方法、LBP 方法和 GLCM 方法的参数设置参照参考文献[10]。WD-AGGM 方法、DT-CWT 方法和 PWT 方法的多分辨率分解尺度为 3;WD-AGGM 方法和 PWT 方法采用基于多贝西小波函数的 6 抽头滤波器;Gabor 方法的尺度、方向分别设为 5、10;LBP 方法引入旋转不变的统一模式,且半径 R 、邻域数 N 分别设为 1、8(记为 LBP_{nu2}^{1-8})和 2、16(记为 LBP_{nu2}^{2-16});GLCM 方法的统计特征取能量、熵、惯性矩、相关,像素点步距 $d=2$,角度 $\gamma=0,\pi/4,\pi/2,3\pi/4$ 。根据参考文献[9],DTCWT-GFM 方法的 DTCWT 层级数 $L=3$,高频子带相似度匹配的逻辑方向数 $D=5$ 。

与 WD-AGGM 方法和 PWT 方法中的小波变换、DTCWT-GFM 方法和 DT-CWT 方法中的双树复小波变换不同,可调控塔式分解在执行每一尺度分解时,行列下采样只针对低频子带,因此对于同样尺寸的原始图像,只有可调控塔式分解比小波变换、双树复小波变换多 1 级的分解尺度,3 种分解变换的单个方向子带的系数个数才会一致。参考文

献[22]设计了面向可调控塔式分解的 0 阶、1 阶、3 阶滤波器组,它们提供的可调控方向数分别为 1, 2, 4。同一级分解变换中,方向子带数太少则难以捕获图像的细节特征,太多则在子带相似性匹配时容易出现错位匹配的情况。因此,SPD 方法、SPD-AGGM-ED 方法及本文方法采用 4 个尺度、4 个方向的可调控塔式分解。

神经网络、支持向量机等分类器需要设置一些参数,而且不同的参数设置会影响最终的分类结果,难以体现对比实验的公平性,因此参与本文对比实验的所有方法统一采用简单而又有效的最近邻分类器。在相似性度量方面,LBP 方法采用目前广泛认可的 χ^2 距离测度;DTCWT-GFM 方法、WD-AGGM 方法及本文方法采用对称的相对熵测度;其他 6 种方法采用欧氏距离测度。

为了更客观地评价各种煤岩识别方法,笔者进行了 10 组实验,取平均值作为各种方法的最终表现。每组实验均从每类煤岩样本中随机选取 50 幅图像作为训练样本,剩下的 50 幅图像用作测试样本,即训练集和测试集的容量均为 300。对比实验结果见表 1。

表1 不同煤岩识别方法的对比结果

煤岩识别方法	平均识别率/%	煤岩识别方法	平均识别率/%
DTCWT-GFM 方法	85.13	LBP_{nu2}^{2-16} 方法	77.40
WD-AGGM 方法	83.47	GLCM 方法	44.73
DT-CWT 方法	72.73	SPD 方法	75.17
PWT 方法	78.60	SPD-AGGM-ED 方法	72.47
Gabor 方法	71.17	本文方法	86.90
LBP_{nu2}^{1-8} 方法	72.03		

从表 1 可看出,本文方法表现最佳,其平均识别率达到 86.90%,比最新的煤岩识别方法——

DTCWT-GFM方法高将近2%。同样是采用非对称广义高斯分布模型拟合煤岩图像的变换域方向子带系数,本文方法的平均识别率比WD-AGGM方法高3.43%,笔者认为,这是因为可调控塔式分解具有平移不变性、方向选择可调控等经典小波变换无可比拟的优势。另外,SPD-AGGM-ED方法的平均识别率为72.47%,比本文方法低14.43%,这说明简单地把由非对称广义高斯分布模型的各参数组成的特征空间假设为欧氏几何空间并不合适。

5 结语

提出的基于可调控塔式分解系数统计建模的煤岩识别方法与现有方法相比,具有更高的识别准确率,为未来实现采煤工作面无人化、建设数字矿山带来了新的启示。

参考文献:

- [1] 国家发展和改革委员会,国家能源局. 国家发展改革委 国家能源局关于印发《能源技术革命创新行动计划(2016—2030年)》的通知(发改能源[2016]513号)[EB/OL]. (2016-04-07)[2016-06-15]. http://www.ndrc.gov.cn/zcfb/zcfbtz/201606/t20160601_806201.html.
- [2] 国家发展改革委,国家能源局. 能源技术革命创新行动计划(2016—2030年)[EB/OL]. [2016-07-15]. <http://www.ndrc.gov.cn/zcfb/zcfbtz/201606/W020160601304245143804.pdf>.
- [3] 王金华,汪有刚,傅俊皓. 数字矿山关键技术研究 with 示范[J]. 煤炭学报,2016,41(6):1323-1331.
- [4] 孙继平. 基于图像识别的煤岩界面识别方法研究[J]. 煤炭科学技术,2011,39(2):77-79.
- [5] 吴婕萍,李国辉. 煤岩界面自动识别技术发展现状及其趋势[J]. 工矿自动化,2015,41(12):44-49.
- [6] 田子建,彭霞,苏波. 基于机器视觉的煤岩界面识别研究[J]. 工矿自动化,2013,39(5):49-52.
- [7] 余杰. 基于图像的煤岩识别方法研究[D]. 北京:中国矿业大学(北京),2014:4-6.
- [8] 苏波. 基于机器视觉的煤岩界面识别方法研究[D]. 北京:中国矿业大学(北京),2013:5-10.
- [9] 孙继平,陈浜. 基于双树复小波域统计建模的煤岩识别方法[J]. 煤炭学报,2016,41(7):1847-1858.
- [10] 孙继平,陈浜. 基于小波域非对称广义高斯模型的煤岩识别算法[J]. 煤炭学报,2015,40(增刊2):568-575.
- [11] 孙继平,刘剑桥. 基于离散余弦变换低频分量特征及学习向量量化的煤岩识别方法[J]. 工矿自动化,2015,41(11):1-6.
- [12] 孙继平,余杰. 基于小波的煤岩图像特征抽取与识别[J]. 煤炭学报,2013,38(10):1900-1904.
- [13] 郝清玉,朱元忠,陈健. 基于图像多小波变换的煤岩界面识别[J]. 工矿自动化,2015,41(2):50-53.
- [14] 张万枝,王增才. 基于视觉技术的煤岩特征分析与识别[J]. 煤炭技术,2014,33(10):272-274.
- [15] 黄韶杰,刘建功. 基于高斯混合聚类的煤岩识别技术研究[J]. 煤炭学报,2015,40(增刊2):576-582.
- [16] 黄韶杰. 基于灰度阈值法的煤岩界面识别研究[J]. 工矿自动化,2013,39(5):52-54.
- [17] SUN Jiping, SU Bo. Coal-rock interface detection on the basis of image texture features[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2013, 23(5):681-687.
- [18] SUN Jiping, SU Bo. Coal-rock interface detection using cluster prominence based on gray level co-occurrence matrices [J]. Advances in Information Sciences and Service Sciences, 2012, 4(8):353-360.
- [19] MENG Huiling, LI Man. Characteristic analysis and recognition of coal-rock interface based on visual technology [J]. International Journal of Signal Processing, Image Processing and Pattern Recognition, 2016, 9(4):61-68.
- [20] ALELAIWI A, ABDUL W, DEWAN M S, et al. Steerable pyramid transform and local binary pattern based robust face recognition for e-health secured login [J]. Computers and Electrical Engineering, 2016, 53:435-443.
- [21] SIMONCELLI E P, FREEMAN W T. The steerable pyramid: a flexible architecture for multi-scale derivative computation[C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Image Processing, Washington, 1995:444-447.
- [22] KARASARIDIS A, SIMONCELLI E. A filter design technique for steerable pyramid image transforms [C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, Atlanta, 1996:2387-2390.