

Journal of Image
and Graphics

中国图象图形学报



ISSN1006-8961
CN11-3758/TB

2012 **2**
Vol.17 No.

中国科学院遥感应用研究所
中国图象图形学学会主办
北京应用物理与计算数学研究所

中国图象图形学报

Zhongguo Tuxiang Tuxing Xuebao

2012年2月 第17卷 第2期(总第190期)

目次

综述

内容感知图像缩放技术综述 施美玲,徐丹(157)

图像处理和编码

引入纹理相似性的纺织品图像增强 杨学志,田晓梅,方静,卢洁(169)

保持边缘特征和增强对比度的图像缩放算法 计忠平,方美娥,王毅刚,吴向阳(178)

以图像认证为目的的分形编码数字水印算法 黄晓晴,于盛林(183)

结合运动矢量和像素递归的全局运动估计方法 赵亚湘,刘少强,樊晓平(191)

无缝栅格数据小波金字塔构建 马伯宁,冷志光,汤晓安,匡纲要(197)

图像分析和识别

伪彩色空间完全非结构化道路检测方法 胡晓辉,孙苗强,苏晓许(203)

未知环境下机器人障碍物检测技术 王文格,武凯宾,朱江,段文彬,许重阳(209)

局部 GAC 模型在医学图像分割中的应用 张建伟,方林,陈允杰,詹天明,罗春燕(215)

判别割(Dcut)的图像分割及其快速分割算法 邹小林,陈伟福,冯国灿(222)

改进的遮挡条件下瞳孔检测方法 潘林,魏丽芳,郑炳锜,余轮(229)

木材显微图像的局部水平集分割方法 汪杭军,祁亨年(236)

关键点检测的线要素综合算法 黄志坚,张金芳,徐帆江(241)

GPU 加速的高分辨率 DEM 图像地形特征线提取算法 刘洲俊,胡包钢(249)

改进 GVF 的自动 Snakes 模型 周亚男,程熙,骆剑承,沈占锋,胡晓东(256)

曲波变换用于磨粒图像不变矩的提取 张云强,张培林,任国全,王国德,徐超,李兵(263)

图像理解和计算机视觉

深度图像中基于轮廓曲线和局部区域特征的3维物体识别 吴莉婷,张宇,杨一平,田原(269)

机载 LiDAR 数据的 LZD 航带平差 王丽英,宋伟东(279)

计算机图形学

基于 Z 曲线的瓦片地图服务空间索引 聂云峰,周文生,舒坚,许虎(286)

虚拟现实和增强现实

GPU 加速的台风可视化方法 秦绪佳,张勤锋,陈坚,郑红波,徐晓刚(293)

中国图象图形学报

刊名题字: 宋 健 月刊(1996 年创刊)

第 17 卷 第 2 期

2012 年 2 月 16 日出版

主管单位 中国科学院
主 办 中国科学院遥感应用研究所
中国图象图形学学会
北京应用物理与计算数学研究所

主 编 李小文

编辑出版 《中国图象图形学报》编辑出版委员会
北京 9718 信箱 邮编 100101
电子信箱:jig@irsa.ac.cn
电话:010-68407995 010-82614429
网 址:www.cjig.cn

印刷装订 北京北林印刷厂

广告经营许可证 京朝工商广字第 0346 号

总 发 行 北京报刊发行局

订 购 全国各地邮局

国外发行 中国国际图书贸易总公司
(中国国际书店)
(北京 399 信箱 邮编 100044)

Superintended by Chinese Academy of Sciences
Sponsored by Institute of Remote Sensing Application,
CAS China Society of Image and Graphics
Institute of Applied Physics and Computational
Mathematics

Chief editor LI Xiaowen

Editor, Publisher Editorial and Publishing Board
of Journal of Image and Graphics
(P. O. Box 9718, Beijing 100101, China)
E-mail:jig@irsa.ac.cn

Distributed by Beijing Bureau for Distribution of Newspapers
and Journals

Domestic All Local Post Offices in China

Foreign China International Book Trading Corporation
(P. O. Box 399, Beijing 100044, China)

Printed by Beijing Beilin Printing House

Journal of Image and Graphics

(Monthly, Started in 1996)

Vol. 17 No. 2 February 2012

Contents

Review

Survey on content-aware image resizing techniques Shi Meiling, Xu Dan (157)

Image Processing and Coding

Enhancement of textile image with texture similarity Yang Xuezhi, Tian Xiaomei, Fang Jing, Lu Jie (169)

Edge-preserving and contrast-enhancement image scaling Ji Zhongping, Fang Mei'e, Wang Yigang, Wu Xiangyang (178)

Watermarking method on fractal coding for image authentication Huang Xiaoqing, Yu Shenglin (183)

Global motion estimation method with motion vectors and pixel recursion Zhao Yaxiang, Liu Shaoqiang, Fan Xiaoping (191)

Seamless wavelet pyramid construction for raster data Ma Boning, Leng Zhiguang, Tang Xiao'an, Kuang Gangyao (197)

Image Analysis and Recognition

Completely unstructured road detection for pseudo-color space Hu Xiaohui, Sun Miaoqiang, Su Xiaoxu (203)

Obstacle detection for robot in unknown environment
..... Wang Wenge, Wu Kaibin, Zhu Jiang, Duan Wenbin, Xu Chongyang (209)

Application of local GAC model for medical image segmentation
..... Zhang Jianwei, Fang Lin, Chen Yunjie, Zhan Tianming, Luo Chunyan (215)

Fast image segmentations of Deut Zou Xiaolin, Chen Weifu, Feng Guocan (222)

Improved method for the pupil measurement under occlusion Pan Lin, Wei Lifang, Zheng Bingkun, Yu Lun (229)

Segmentation method of wood microscopic image based on local level set Wang Hangjun, Qi Hengnian (236)

Algorithm of line generalization with key point detection Huang Zhijian, Zhang Jinfang, Xu Fanjiang (241)

High resolution DEM topographic feature line extraction algorithm using GPU Liu Zhoujun, Hu Baogang (249)

Automatic snakes model based on modified GVF Zhou Yanan, Cheng Xi, Luo Jiancheng, Shen Zhanfeng, Hu Xiaodong (256)

Invariant moment extraction by curvelet transform for wear particle images
..... Zhang Yunqiang, Zhang Peilin, Ren Guoquan, Wang Guode, Xu Chao, Li Bing (263)

Image Understanding and Computer Vision

Three-dimensional free-form object recognition based on contour curve and local surface patches in range images
..... Wu Liting, Zhang Yu, Yang Yiping, Tian Yuan (269)

Least Z-difference strip adjustment of airborne LiDAR data Wang Liying, Song Weidong (279)

Computer Graphics

Spatial index for tile map service based on Z curve Nie Yunfeng, Zhou Wensheng, Shu Jian, Xu Hu (286)

Virtual Reality and Augmented Reality

GPU accelerated typhoon visualization method Qin Xujia, Zhang Qinfeng, Chen Jian, Zheng Hongbo, Xu Xiaogang (293)

中图分类号: TK401.2 TP391. 文献标志码: A 文章编号: 1006-8961(2012)02-0263-06

论文引用格式: 张云强, 张培林, 任国全, 王国德, 徐超, 李兵. 曲波变换用于磨粒图像不变矩的提取 [J]. 中国图象图形学报, 2012, 17(2): 263-268

曲波变换用于磨粒图像不变矩的提取

张云强, 张培林, 任国全, 王国德, 徐超, 李兵

军械工程学院, 石家庄 050003

摘要: 曲波变换(curvelet)具有各向异性和良好的曲线奇异性表达能力。为了克服Hu不变矩和不变小波矩在表达铁谱磨粒形貌信息方面的不足,将曲波变换引入磨粒特征提取过程,并与Hu不变矩结合,提出一种基于曲波变换的磨粒图像不变矩提取方法。首先利用曲波变换将图像进行分解与重构,得到不同尺度的子图像;然后提取各子图像的Hu不变矩,获得图像的曲波不变矩;最后将该方法应用于典型磨粒识别,总识别率达到83.33%。实验结果表明,与Hu不变矩和不变小波矩相比,磨粒图像的曲波不变矩能更好地表达磨粒的形貌特征。

关键词: Hu不变矩;曲波变换;特征提取;磨粒识别

Invariant moment extraction by curvelet transform for wear particle images

Zhang Yunqiang, Zhang Peilin, Ren Guoquan, Wang Guode, Xu Chao, Li Bing

Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050003, China

Abstract: The curvelet transform has the characteristic of anisotropy and the ability of good curve singularity expression. To overcome the shortage of invariant wavelet moments and Hu's invariant moments, curvelet transform is introduced into the wear particle feature extraction process and combined with Hu's invariant moments. Thus, an image invariant moment extracting method utilizing curvelet transform is proposed. First the wear particle images are decomposed and reconstructed by a curvelet transform, and their sub images of different scales are obtained. Then, the curvelet invariant moments are achieved by extracting Hu's invariant moments. Finally, the proposed method is applied for typical wear particle recognition, and a total successful recognition rate of 83.33% is accomplished. The experimental results indicate that compared with Hu's invariant moments and invariant wavelet moments, the curvelet invariant moments can better express wear particle appearance characteristics.

Key words: Hu's invariant moments; curvelet transform; feature extraction; wear particle recognition

0 引言

磨粒是由机器摩擦副表面相对运动,并与界面介质与环境产生相互作用,引起一系列摩擦学过程,导致表面磨损形成的产物。磨粒本身携带着丰富的摩擦学信息,能够反映机械的健康状态,如何提取有

效特征来反映磨粒中蕴涵的有用信息,一直是磨粒识别的焦点和难题。Hu在图像各阶矩的基础上,经过一系列的代数恒等变换,提出7个对平移、缩放、镜像和旋转都不敏感的不变矩^[1]。虽然不变矩的上述优点被广泛应用^[2-3],但是它不具多分辨特性,对图像细节信息的反映能力较差。随着小波变换理论和分析技术的快速发展,人们将矩理论与其相结

收稿日期:2011-01-24;修回日期:2011-06-09

基金项目:国家自然科学基金项目(50705097);清华大学摩擦学国家重点实验室开放基金项目(SKLTkF09B06)

第一作者简介:张云强(1987—),男,现为军械工程学院车辆工程专业硕士研究生,主要研究方向为图像处理、模式识别与故障诊断。

E-mail: zhangyunqiangoe@163.com

合,提出具有多分辨特性的不变小波矩^[4]。然而小波变换具有各向同性,并且对图像曲线奇异表达能力不足,因而对于线奇异丰富的铁谱磨粒图像而言,小波矩也不能很好的反映图像形貌信息。

Candes 和 Donoho 提出的曲波 (curvelet) 变换^[5-8],不但保留了小波变换的多分辨特性,而且还具有各向异性特点,可以很好地逼近奇异曲线,其在图像处理某些方面的能力优于小波。国内外一些文献将曲波变换应用于图像特征提取和目标识别^[9-11],取得了很好的效果,但主要对象集中于人脸图像。鉴于此,针对 Hu 不变矩和不变小波矩在磨粒识别中存在的不足,本文将曲波变换与 Hu 不变矩相结合,提出基于曲波变换的不变矩特征提取方法,并应用于铁谱磨粒识别。

1 Hu 不变矩与曲波变换相关理论

1.1 2 维图像的矩和 Hu 不变矩理论

如果一幅数字图像满足分段连续,且在 X-Y 平面上只有有限个非零点,则可以证明该数字图像的各阶矩存在^[12]。对于 2 维离散的数字图像而言,假设图像的分布函数是 $f(x, y)$, 则图像的规则矩 m_{pq} 定义^[13]为

$$m_{pq} = \sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N x^p y^q f(x, y) dx dy \quad (1)$$

为了满足平移不变性,将矩函数的坐标原点到图像的中心位置,得到相应的图像的中心矩 u_{pq} 的定义为

$$u_{pq} = \sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N (x - \bar{x})^p (y - \bar{y})^q f(x, y) dx dy \quad (2)$$

式中, $\bar{x} = m_{10}/m_{00}, \bar{y} = m_{01}/m_{00}$ 。

对中心矩 u_{pq} 进行归一化操作,得到归一化中心矩 η_{pq} 的定义为

$$\eta_{pq} = u_{pq}/u_{pq}^\gamma \quad (3)$$

式中, $\gamma = \frac{1}{2}(p + q) + 1$ 。

上述定义的图像规则矩和中心矩可用于描述区域的形状,但是都不具有不变性。因此,1962 年, Hu 在上述定义的基础上,经过一系列的代数恒等变换,提出 $p + q \leq 3$ 的 7 个具有平移、缩放、镜像和旋转不变性的不变矩,其公式如下^[1]:

$$M_1 = \eta_{20} + \eta_{02} \quad (4)$$

$$M_2 = (\eta_{20} - \eta_{02})^2 + 4\eta_{11}^2 \quad (5)$$

$$M_3 = (\eta_{30} - 3\eta_{12})^2 + (3\eta_{21} - \eta_{03})^2 \quad (6)$$

$$M_4 = (\eta_{30} + \eta_{12})^2 + (\eta_{21} + \eta_{03})^2 \quad (7)$$

$$M_5 = (\eta_{30} - 3\eta_{12})(\eta_{30} + \eta_{12})[(\eta_{30} + \eta_{12})^2 - 3(\eta_{21} + \eta_{03})^2] + (3\eta_{21} - \eta_{03})(\eta_{21} + \eta_{03}) \times [3(\eta_{30} + \eta_{12})^2 - (\eta_{21} + \eta_{03})^2] \quad (8)$$

$$M_6 = (\eta_{20} - \eta_{02})[(\eta_{30} + \eta_{12})^2 - (\eta_{21} + \eta_{03})^2] + 4\eta_{11}(\eta_{30} + \eta_{12})(\eta_{21} + \eta_{03}) \quad (9)$$

$$M_7 = (3\eta_{21} - \eta_{03})(\eta_{30} + \eta_{12})[(\eta_{30} + \eta_{12})^2 - 3(\eta_{21} + \eta_{03})^2] + (3\eta_{12} - \eta_{30})(\eta_{21} + \eta_{03}) \times [3(\eta_{30} + \eta_{12})^2 - (\eta_{21} + \eta_{03})^2] \quad (10)$$

1.2 曲波变换理论

为了克服小波变换沿边缘信息表达能力的不足以及 Ridgelet 变换不能有效表示曲线奇异性特征的缺陷,Candes 和 Donoho 于 1999 年提出 Curvelet 变换^[5],称为第 1 代 Curvelet 变换。由于第 1 代曲波变换算法冗余度较高,且不易于理解和使用,后来,Candes 等人于 2002 年提出第 2 代 Curvelet 变换^[8],为提高变换实现速度提供了可能。下面对第 2 代曲波变换进行介绍。

首先在 2 维空间 \mathbf{R}^2 中,定义两个窗函数,径向窗函数 $W(r)$, $r \in (0.5, 2)$ 和角度窗函数 $V(t)$, $t \in [-1, 1]$ 。它们满足可允许条件

$$\sum_{j=-\infty}^{\infty} W^2(2^j r) = 1 \quad r \in (0.75, 1.5) \quad (11)$$

$$\sum_{j=-\infty}^{\infty} V^2(t - l) = 1 \quad r \in (-0.5, 0.5) \quad (12)$$

然后在频域中,对每一个 $j \geq j_0$,通过 $W(r)$ 和 $V(t)$ 定义频率窗为

$$U_j(r, \theta) = 2^{-3j/4} W(2^{-j} r) V\left(\frac{2^{[j/2]} \theta}{2\pi}\right) \quad (13)$$

式中, $[j/2]$ 是 $j/2$ 的整数部分。 U_j 的支撑区间是受 W 和 V 支撑区间限制而获得的楔形区域,具有各向异性的尺度特性。

另外,引入均匀旋转角度序列 θ_l 和平移参数 \mathbf{k} 两个概念。其中, $\theta_l = 2\pi \cdot 2^{[-j/2]} l$, $l = 0, 1, \dots; 0 \leq \theta_l \leq 2\pi; \mathbf{k} = (k_1, k_2) \in \mathbf{Z}^2, \mathbf{Z}$ 代表整数集。

综合以上概念,定义在尺度 2^j , 方向 θ_l , 平移参数 (k_1, k_2) 处的 Curvelet 为

$$\varphi_{j,l,k}(x) = \varphi_j(R_{\theta_l}(x - x_k^{(j,l)})) \quad (14)$$

式中, $x_k^{(j,l)} = R_{\theta_l}^{-1}(k_1 2^{-j}, k_2 2^{-j/2})$, R_{θ_l} 由 θ_l 旋转获得。

于是,连续 Curvelet 变换便可以表示为

$$c(j,l,k) = \langle f, \varphi_{j,l,k} \rangle = \int_{R^2} f(x) \overline{\varphi_{j,l,k}}(x) dx \quad (15)$$

式中, $\langle f, \varphi_{j,l,k} \rangle$ 表示 f 和 $\varphi_{j,l,k}$ 的内积, $\overline{\varphi_{j,l,k}}(x)$ 为 $\varphi_{j,l,k}(x)$ 的共轭复数。

2 基于曲波变换图像不变矩提取方法

2.1 曲波变换实现算法的选择

在实际生活中,为了便于利用计算机进行分析和计算,图像都是以2维离散数据进行保存的。因此连续曲波变换不能在图像处理中直接使用,需采用其离散形式。文献[6]介绍了两种离散曲波变换的实现算法,分别称为 USFFT 算法(unequally-spaced fast Fourier transform)和 Wrap 算法(wrapping-based transform)。由于两种算法具有相同的分解结果,本文选择 USFFT 算法,具体算法如下:

1)对于给定的一个笛卡儿坐标系下的2维函数进行2维傅里叶变换,得到2维频域表示 $\hat{f}[n_1, n_2]$, 其中 $-n/2 \leq n_1, n_2 \leq n/2$ 。

2)在频域,对于每一对(尺度 j , 角度 l),重采样 $\hat{f}[n_1, n_2]$, 得到采样值 $\hat{f}[n_1, n_2 - n_1 \tan \theta_l]$, 其中 $(n_1, n_2) \in P_j$, P_j 表示窗函数 $U_j[n_1, n_2]$ 的支撑区间。

3)将内插后的 \hat{f} 与窗函数 \tilde{U}_j 相乘可以得到

$$\hat{f}[n_1, n_2] = \hat{f}[n_1, n_2 - n_1 \tan \theta_l] \tilde{U}_j[n_1, n_2] \quad (16)$$

4)对 $\hat{f}_{j,l}$ 进行2维傅里叶逆变换,由此得到离散的曲波系数 $c(j,l,k)$ 。

2.2 基于曲波变换的图像分解与重构

假设最大尺度数为 m (一般情概况下 $m \leq \log_2 M - 3$), 则一幅离散的图像(大小为 $M \times M$)经过曲波变换后被划分为 m 个尺度层:1 个 Coarse 层,由低频系数组成,反映图像的低频信息; $m - 2$ 个中间 Detail 层,由中高频系数组成,反映图像的中高频信息;1 个 Fine 层,由高频系数组成,反映图像的高频信息。每层得到由 $c(j, l, k)$ 组成的具有 $C\{j\}\{l\}(k_1, k_2)$ 结构的系数集合 $C\{j\}$, 其中 j 表示尺度, l 表示方向, (k_1, k_2) 表示尺度层上第 l 个方向的矩阵坐标。

本文采取单尺度重构策略重构原图像。

首先,对图像 T 进行曲波变换,得到 m 个尺度层系数;

其次,利用这些反映图像不同信息的尺度层系数,每次取其中一层系数,同时令其他层系数全为0进行曲波逆变换,得到重构图像 T_j 。

经前面分析可知,子图像 T_j 能够很好地反映原图像不同频率信息。取最大尺度数 $m = 5$, 则一幅磨粒图像经过曲波变换分解与重构的效果,如图1所示。

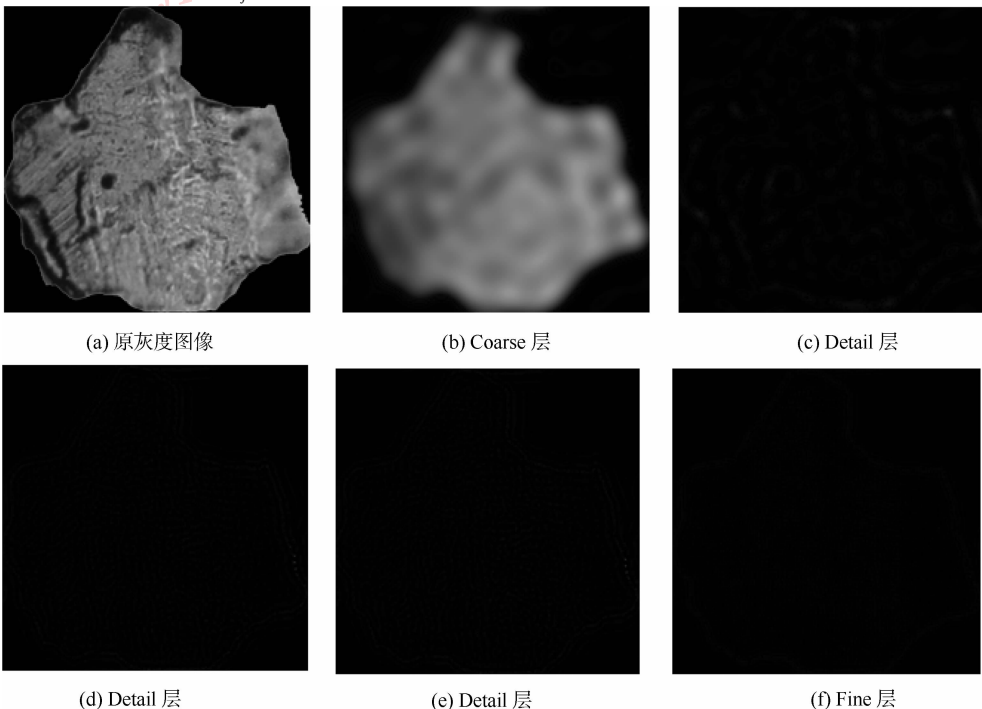


图1 分解与重构的效果

Fig. 1 Decomposition and reconstruction effect

其中图 1(b)一(f) 清晰地展示了图像的不同频率信息,尤其是曲线奇异性信息。

2.3 图像曲波不变矩提取步骤

为了获取能有效反映图像信息的曲波不变矩,在进行曲波变换之前,原图像需要经过一系列预处理。因此,基于曲波变换的图像不变矩提取的步骤如下:

1)对原图像 T_0 进行图像增强、降噪、分割和色差矫正;

2)为保护原图像信息,并适应曲波变换输入的需要,利用 MATLAB 7.02 工具箱中的函数 `padarray()` 将预处理后的图像转变成大小为 $\max\{M,N\} \times \max\{M,N\}$ 的灰度图像 T ;

3)设定最大尺度数 m ,对 T 进行曲波变换,得到各尺度层系数集合 $C\{j\}$;

4)采取单尺度重构策略重构原图像,得到子图像 T_j ;

5)计算子图像 T_j 的 Hu 不变矩,并将图像 T 的所有不变矩拼接成一个曲波不变矩向量。

2.4 曲波不变矩性能分析

为了分析曲波不变矩的性能,任取两幅典型磨粒图像(记为磨粒 1 和磨粒 2),分别进行缩小、旋转、加噪(高斯噪声和椒盐噪声)等操作之后,提取各图像的曲波不变矩。为列举方便,对数据取自然对数后再求绝对值,部分结果如表 1 和表 2 所示。

表 1 磨粒 1 不同操作后的曲波不变矩

Table 1 Curvelet invariant moments of wear particle 1 after different operations

| 操作 | 曲波不变矩 | | | | | | | | | |
|------|---------|----------|---------|---------|----------|----------|----------|----------|----------|---------|
| 原图 | 3.838 3 | 11.539 6 | 3.444 0 | 5.967 9 | 7.969 2 | 13.001 2 | 13.766 8 | 21.592 9 | 108.125 | 216.158 |
| 缩小 | 3.707 0 | 11.529 9 | 3.478 4 | 4.915 3 | 10.491 1 | 17.146 4 | 11.350 8 | 21.208 2 | 83.001 4 | 166.002 |
| 旋转 | 3.841 5 | 11.554 3 | 3.626 0 | 6.505 2 | 8.219 2 | 13.012 6 | 13.517 2 | 20.937 7 | 105.948 | 201.782 |
| 平移 | 3.842 4 | 11.367 9 | 3.769 4 | 4.645 3 | 7.910 1 | 13.152 6 | 13.064 9 | 21.080 7 | 106.090 | 212.087 |
| 高斯噪声 | 3.822 6 | 11.703 9 | 3.831 8 | 6.837 7 | 7.938 3 | 13.051 3 | 12.808 9 | 20.503 7 | 109.606 | 219.123 |
| 椒盐噪声 | 3.830 2 | 11.758 4 | 3.789 2 | 6.693 8 | 8.634 6 | 14.433 4 | 13.521 8 | 21.376 2 | 110.594 | 221.188 |

表 2 磨粒 2 不同操作后的曲波不变矩

Table 2 Curvelet invariant moments of wear particle 2 after different operations

| 操作 | 曲波不变矩 | | | | | | | | | |
|------|---------|----------|---------|---------|----------|----------|----------|----------|----------|---------|
| 原图 | 4.102 5 | 11.152 4 | 3.878 2 | 6.274 3 | 7.833 7 | 13.220 5 | 16.067 4 | 23.034 0 | 104.805 | 229.611 |
| 缩小 | 4.104 0 | 10.130 1 | 2.973 1 | 4.540 7 | 10.892 5 | 11.945 0 | 14.099 8 | 19.602 7 | 84.280 3 | 168.443 |
| 旋转 | 4.104 0 | 11.143 0 | 3.656 0 | 6.452 5 | 7.857 6 | 12.885 7 | 16.358 3 | 24.008 0 | 102.160 | 204.199 |
| 平移 | 4.076 1 | 10.854 2 | 3.352 3 | 5.944 3 | 7.767 8 | 12.980 9 | 16.426 9 | 23.260 0 | 107.447 | 214.802 |
| 高斯噪声 | 4.061 2 | 11.510 6 | 3.924 3 | 6.532 3 | 8.269 8 | 13.185 1 | 15.969 7 | 24.325 9 | 106.553 | 213.107 |
| 椒盐噪声 | 4.060 9 | 11.360 8 | 3.672 6 | 5.869 8 | 8.140 7 | 13.814 4 | 16.140 5 | 24.252 1 | 107.011 | 214.022 |

通过对表 1 和表 2 数据进行分析,可以看出:

1)曲波不变矩具有很好的尺度、旋转不变性;

2)由于磨粒图像是离散的图像,文献[14]指出在离散情况下 Hu 不变矩没有缩放不变性,所以曲波不变矩的平移不变性稍差;

3)图像添加了高斯噪声和椒盐噪声之后,曲波不变矩变化不大,因此曲波不变矩具有对图像噪声不敏感的特性。这一优点可以降低磨粒图像特征提

取之前降噪的要求。

3 铁谱磨粒识别及结果分析

为验证本文方法在铁谱磨粒识别中的性能,从 DP 安德森磨粒图库^[15]中选择了 5 类不同数量的典型磨粒图像,利用子图不变矩特征进行磨粒识别。同时,计算图像的 Hu 不变矩和不变小波矩,分别作为磨粒特征进行磨粒识别,并作为对比实验。

实验中,选择相关函数 $R(i,j)$ 作为两图像的相似性测度。相关函数 $R(i,j)$ 的定义如下

$$R(i,j) = \frac{\sum_{k=1}^n X_i(k)X_j(k)}{\sqrt{\sum_{k=1}^n [X_i(k)]^2} \sqrt{\sum_{k=1}^n [X_j(k)]^2}} \quad (17)$$

式中, X_i, X_j 分别为两幅磨粒图像的曲波不变矩向量, n 为向量维数。根据许瓦尔兹不等式有 $0 \leq R(i,j) \leq 1$ 。

由 $R(i,j)$ 的意义可知, $R(i,j)$ 越大,图像 T_i 和 T_j 越相似,因此实验中以最大相似度为准则,将 36 个已知类型的典型磨粒图像作为测试图像,3 类不变矩识别的结果,如表 3—表 5 所示。

表 3 Hu 不变矩识别结果

Table 3 Recognition result of Hu's invariant moments

| | 磨粒类型 | | | | |
|--------|-------|------|------|------|------|
| | 正常滑动 | 切削磨粒 | 疲劳剥块 | 球状磨粒 | 氧化磨粒 |
| 测试个数 | 12 | 6 | 7 | 7 | 4 |
| 正确识别 | 9 | 4 | 5 | 6 | 2 |
| 识别率/% | 75.0 | 66.6 | 71.4 | 85.7 | 50.0 |
| 总识别率/% | 72.22 | | | | |

表 4 不变小波矩识别结果

Table 4 Recognition result of invariant wavelet moments

| | 磨粒类型 | | | | |
|--------|-------|------|------|------|------|
| | 正常滑动 | 切削磨粒 | 疲劳剥块 | 球状磨粒 | 氧化磨粒 |
| 测试个数 | 12 | 6 | 7 | 7 | 4 |
| 正确识别 | 10 | 3 | 6 | 6 | 2 |
| 识别率/% | 83.3 | 50.0 | 85.7 | 85.7 | 50.0 |
| 总识别率/% | 75.00 | | | | |

表 5 曲波不变矩识别结果

Table 5 Recognition result of curvelet invariant moments

| | 磨粒类型 | | | | |
|--------|-------|------|------|------|------|
| | 正常滑动 | 切削磨粒 | 疲劳剥块 | 球状磨粒 | 氧化磨粒 |
| 测试个数 | 12 | 6 | 7 | 7 | 4 |
| 正确识别 | 10 | 5 | 6 | 7 | 2 |
| 识别率/% | 83.3 | 83.3 | 85.7 | 100 | 50.0 |
| 总识别率/% | 83.33 | | | | |

由表 3—表 5 实验结果可知,利用曲波不变矩特征进行磨粒识别,总识别率达到 83.33%,效果明

显优于 Hu 不变矩和不变小波矩。由于切削磨粒和球状磨粒具有明显的曲线奇异性特征,故曲波不变矩对其识别效果显著提高;而氧化磨粒不是根据形貌分类而来,故识别效果没有提高。因此,磨粒图像的曲波不变矩能更有效地表达典型磨粒的曲线奇异性特征,是铁谱磨粒识别的一类有效特征参数。

4 结 论

针对具有线奇异特性磨粒的特征提取问题,将曲波变换引入磨粒特征提取过程,提出一种基于曲波变换分解与重构的图像不变矩提取方法。对比实验证明,与 Hu 不变矩和不变小波矩相比,所提取的曲波不变矩特征,能更好地表达磨粒的曲线奇异性特征,具有更高的磨粒识别正确率,是表达磨粒形貌特征的有效参数。

参考文献 (References)

[1] Hu M K. Visual pattern recognition by moment invariants[J]. IEEE Transactions on Information Theory,1962,8(2): 178-187.

[2] Huang X X, Li H G, Zhu Z H. The morphologic classification of sea surface slicks in SAR image based on invariant moments[J]. Journal of Image and Graphics,1999,4(2): 166-170. [黄晓霞,李红岩,朱振海.基于不变矩的 SAR 图象海面油膜形态分类[J].中国图象图形学报,1999,4(2):166-170.]

[3] Yang H Y, Du W B, Zhang L, et al. The application of image recognition method based on Hu moment Invariants in auto-pouring system[J]. Journal of Shenyang Ligong University,2009,28(5): 34-37. [杨慧英,杜文斌,张璐,等.Hu 不变矩识别算法在自动浇注系统中的应用[J].沈阳理工大学学报,2009,28(5):34-37.]

[4] Wang X Y, Yang Y P, Yang H Y. A new robust digital image watermarking based on wavelet moments[J]. Journal of Image and Graphics,2010,15(5): 15-19. [王向阳,杨艺萍,杨红颖.基于小波矩的抗几何攻击数字图像水印算法研究[J].中国图象图形学报,2010,15(5):15-19.]

[5] Candes E J, Donoho D L. Curvelet—a Surprisingly Effective Nonadaptive Representation for Objects with Edges[M]// Rabut C, Cohen A, Schumaker L L. Curves and Surfaces. Nashville, USA: Vanderbilt University Press,1999: 105-120.

[6] Candes E J, Demanet L, Donoho D L. Fast Discrete Curvelet Transform [R]. california: Applied and Computational Mathematics. California Institute of Technology,2005: 1-43.

[7] Xu X B, Zhang D Y, Zhnag X M, et al. Palmprint recognition based on discrete curvelet transform and support vector machine [J]. Infrared Millim Waves,2009,28(6): 456-460. [许学斌,

- 张德运,张新曼,等. 基于离散曲波变换和支持向量机的掌纹识别方法[J]. 红外与毫米波学报,2009,28(6):456-460.]
- [8] Candes E J, Donoho D L. Recovering edges in ill-posed inverse problems: optimality of curvelet frames [J]. Ann. Statist, 2002, 30(3) : 784-842.
- [9] Mandal T, Majumdar A, Jonathan W Q M. Face recognition by curvelet based feature extraction [J]. Lecture Notes in Computer Science, 2007, 4633 (1) : 806-817.
- [10] Saha A, Jonathan Wu Q M. Curvelet entropy for facial expression recognition [J]. Lecture Notes in Computer Science, 2011, 6298(1) : 617-628 .
- [11] Xu X B, Zhang D Y, Zhang X M, et al. Method for face recognition using second-generation curvelet transform and back propagation neural netwo [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2008, 40(10) : 1213-1237. [许学斌, 张德运, 张新曼, 等. 采用二代曲波变换和反向传播神经网络的人脸识别方法 [J]. 西安交通大学学报, 2008, 40 (10) : 1213-1237.]
- [12] Canstle M K R. Digital Image Processing [M]. New York: Prentice Hall, 1996.
- [13] Xu X D, Zhou Y H. Pattern recognition based on wavelet moment invariants [J]. Journal Infrared Millim Waves, 2000, 19(3) : 215-218. [徐旭东, 周源华. 基于小波矩不变量的模式识别方法 [J]. 红外与毫米波学报, 2000, 19 (3) : 215-218.]
- [14] Chang J L, Din M Y, Peng J X. Moment invariants algorithms [J]. Journal of Data Acquisition & Processing, 1992, 7(1) : 1-9. [常金玲 丁明跃, 彭嘉雄. 不变矩算法研究 [J]. 数据采集与处理, 1992, 7(1) : 1-9.]
- [15] Anderson D P. Wear Particle Atlas Beijing: China Machine Press [安德森 D P. 磨粒图谱 [M]. 金元生, 杨其明译. 北京: 机械工业出版社, 1987.]