

基于多尺度 Retinex 和 NSCT 的泡沫图像增强方法^①

李建奇^{②***} 阳春华^{③*} 朱红求^{*} 曹斌芳^{*}

(^{*} 中南大学信息科学与工程学院 长沙 410083)

(^{**} 湖南文理学院电气与信息工程学院 常德 415000)

摘 要 针对矿物浮选过程中获取的泡沫图像易受环境光照影响、噪声干扰和存在灰度对比度低等问题,提出一种结合多尺度 Retinex (MSR) 算法和非下采样 Contourlet 变换 (NSCT) 的泡沫图像增强方法。该方法首先针对光照使得浮选泡沫图像存在亮度不均,用一种区域自适应分割的 MSR 算法,通过调整权值改善图像的整体亮度均匀性;然后采用 NSCT,通过构造分类函数完成对包含细节和噪声的高频系数处理,有效地弥补了 Retinex 算法在细节增强效果和噪声消除方面的不足。实验仿真结果表明,该方法能有效增强泡沫图像的轮廓、边缘和细节,抑制噪声,明显改善泡沫图像的视觉效果,为浮选泡沫图像的特征提取和品位分析奠定基础。

关键词 泡沫图像, 图像增强, 多尺度 Retinex (MSR), 非下采样 Contourlet 变换 (NSCT)

0 引言

泡沫图像增强方法常用于矿物浮选过程中。浮选是根据矿物颗粒表面物理化学性质不同从矿石中分离有用矿物的方法。在矿物浮选过程中,为预测矿物品位,需要提取大量泡沫图像特征参数,如泡沫大小就是一个十分重要的特征参数。泡沫图像的表面视觉特征与浮选工况有很大关系^[1-3]。由于受浮选现场矿浆与泡沫层对光线的散射和吸收作用影响,泡沫图像的对比较低,细节模糊,而且受环境光照以及光源角度的影响,使得泡沫图像亮度不均,存在大量噪声。这些问题极大地增加了泡沫视觉特征提取的难度、降低了泡沫图像视觉特征检测精度,容易造成浮选工况的错误判决,影响浮选生产的加药量、通风量操作的实施^[4]。因此,在进行浮选泡沫颜色特征、形态特征以及纹理特征的提取之前,需要对泡沫图像进行增强处理,即增强对比度,提高信噪比,去除光照影响,从而增强图像细节,改善视觉效果。为此,本文提出了一种基于多尺度 Retinex 算法(一种基于人类视觉生物特性的图像增强算法)和非下采样 Contourlet 变换 (nonsampled Contourlet transform, NSCT) 的图像增强方法,该方法可明显

提高泡沫图像的视觉效果,从而有效提高基于图像特征的品位分析和工况识别的准确性。

1 相关工作

图像增强方法主要包括空间域和变换域两大类。空间域算法直接在原始图像上进行运算,常用的有直方图均衡化和反锐化掩模法^[5-7]等,该类方法针对低对比度的泡沫图像,易使噪声增大而图像细节增强不足。为了克服以上问题,人们引入了变换域方法,比较有代表性的包括傅里叶变换、小波变换的方法^[8,9]等。傅里叶变换用信号的频谱特性解决了许多时域内难以解决的问题,但该变换不具有时频局部化的能力,容易造成图像细节信息丢失。而小波变换同时具有时频局部化特性,很好地解决了傅里叶变换存在的单一特性,且图像的梯度提供了比直方图更直接、更多的空间信息。但小波变换对点奇异性比较敏感,且对边缘方向表达能力有限。Do 等人提出了一种多尺度几何分析工具——Contourlet 变换^[10],它是一种多尺度分析方法,能有效地刻画高维信息的特征,但是由于存在采样操作,Contourlet 变换缺乏平移不变性,在进行图像去噪增强

① 国家自然科学基金(61134006),国家科技支撑计划(2012BAF03B05)和湖南省自然科学基金(11JJ6062)资助项目。

② 男,1980 年生,博士生;研究方向:图像信息处理与识别;E-mail: li_jianqi@126.com

③ 通讯作者,E-mail: ychh@mail.csu.edu.cn

(收稿日期:2012-04-24)

时会产生伪吉布斯现象。针对此问题, Cunha 等人^[11]构造了非下采样 Contourlet 变换 (nonsampled Contourlet transform, NSCT), 用此能够保证信号的平移不变性, 有效消除伪吉布斯效应。但是上述方法对于环境造成的泡沫光照不均匀, 无法有效地消除光照影响。由于 Retinex 算法是一种基于人类视觉生物特性的方法, 它以色彩恒常性理论为基础, 能很好地改善图像亮度均匀性^[12]。

基于以上分析, 本研究提出一种结合多尺度 Retinex (multi-scale Retinex, MSR) 算法和 NSCT 的浮选泡沫图像增强方法。该方法针对泡沫图像的顶点区域和边缘区域亮度差别大的问题, 采用区域自适应分割的 MSR 算法进行图像增强; 为了进一步改善细节增强和去噪效果, 引入 NSCT 进行分类处理。

现场采集图像仿真结果表明, 该方法能有效地改善泡沫图像的亮度均匀性, 增强图像边缘细节信息, 消除噪声, 能满足后续图像处理的要求。

2 光照不均匀泡沫图像处理

某铝土矿浮选泡沫图像的采集平台主要由高分辨率工业摄像机和高频光源等组成, 浮选槽内矿浆温度高, 现场灰尘多, 条件光照不均匀, 使得气泡与矿浆背景灰度反差小, 造成所获取的泡沫图像存在诸多问题, 严重影响后续图像的特征提取和工况分析。图 1(a)(b) 为从工业现场获取的原始泡沫图像, 均具有亮度不均匀, 背景偏暗, 受噪声影响明显等特点。

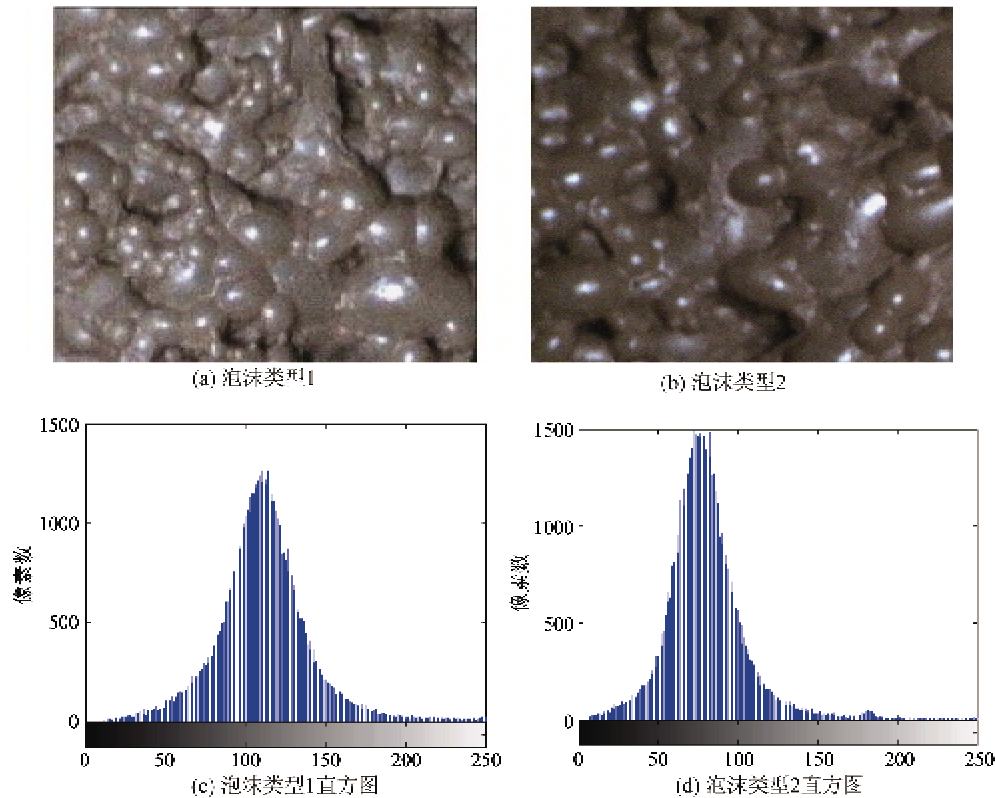


图 1 原始泡沫图像及直方图

分析泡沫图像及其灰度直方图见图 1(c)(d), 发现泡沫顶点和边缘灰度差别大, 存在高亮点和阴影区域, 边缘模糊, 直方图形态单一, 且为单峰, 像素灰度分布比较集中。针对以上问题, 本文首先引入多尺度 Retinex 增强算法, 以改善图像的亮度均匀性, 提高图像质量。

从人类视觉的生物特性出发, Land 提出了 Retinex 算法^[12], 该方法作为人眼感知亮度和色度的视

觉模型, 其实质是将一幅图像 $S(x, y)$ 用亮度图像 $F(x, y)$ 和物体反射图像 $L(x, y)$ 的乘积表示, 即

$$S(x, y) = F(x, y) \cdot L(x, y) \quad (1)$$

单尺度 Retinex (single-scale Retinex, SSR) 算法可以表示为:

$$f(x, y) = \log[I(x, y)] - \log[I(x, y) \cdot G(x, y)] \quad (2)$$

Retinex 理论进行图像增强的关键是从原图像

有效的信息中计算出亮度图像 $L(x, y)$ 。但是从原图像计算亮度图像在数学上是一个奇异问题,因此只能通过数学上近似估计的方式估算亮度图像。常用的有指数形式、平方反比的环境形式以及高斯指数形式,但是 Jobson 论证了高斯卷积函数可以更好地增强图像,其表示为

$$G(x, y) = k \exp\left[-\frac{x^2 + y^2}{\varepsilon^2}\right] \quad (3)$$

其中 k 是常量矩阵, ε 是滤波半径,并且满足

$$\iint G(x, y) dx dy = 1 \quad (4)$$

在尺度参数 ε 较小时,单尺度 Retinex 的动态压缩能力强,图像中的细节部分能较好地凸现出来,单输出图像有一定程度上的颜色失真现象;当 ε 较大时,输出图像的颜色保真度好,但会削弱动态压缩能力。对于泡沫图像,色感一致性体现了在不同亮度情况下分辨物体灰度级(亮度)的能力,能够对不同照度下的细节都有增强作用。为了在动态范围压缩和色感一致性之间取得较好的平衡,Jobson 等^[13]提出了多尺度 Retinex 算法。该算法可描述为

$$f(x, y) = \sum_{i=1}^K w_i \{ \log I(x, y) - \log [G_i(x, y) \cdot I(x, y)] \} \quad (5)$$

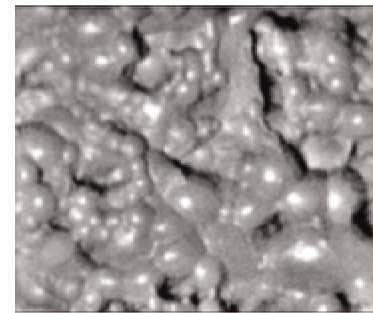
式中 K 为维数, w_i 为对应于第 i 个尺度 ε_k 的权值,且满足 $\sum_{i=1}^K w_i = 1$ 。

经典 MSR 算法在处理图像时,通过结合多个高斯环绕尺度提取反射分量来减弱高对比度边缘的晕环效应,但是由于 Retinex 算法是假设光照平滑的前提下提出的,因此在处理有光照变化剧烈或者存在阴影的图像时,会在明暗变化剧烈的边缘形成光晕现象。

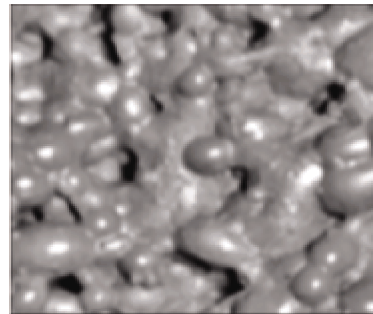
针对泡沫图像可以分为平坦的泡沫顶点区域和边缘区域,本文提出一种区域自适应分割的 MSR 算法进行图像增强。该算法首先采用 Otsu 阈值分割方法进行图像分割,获得泡沫顶点区域(高亮区域),再选择 3×2 的椭圆结构元素对获得二值泡沫图像采用灰度形态学开闭重构滤波器和平滑滤波器滤除图像中的噪声,并获得较好的区域边界;然后针对不同区域采用自适应权值实行多尺度 Retinex 算法。

本文中多尺度 Retinex 算法取大、中、小三个尺度,即 $K = 3$, 尺度参数 ε_1 取为 15, ε_2 取为 80, ε_3 取为 200;权值 w_k 使用区域自适应,即在泡沫顶点区域,即平坦光滑区域以大、中尺度处理值为主 ($w_1 =$

$2/5, w_2 = 2/5, w_3 = 1/5$), 在边缘区域以中、小尺度为主 ($w_1 = 1/5, w_2 = 2/5, w_3 = 2/5$)。对图 1 经上述方法处理后的图像如图 2 所示。



(a) 泡沫类型 1



(b) 泡沫类型 2

图 2 改进 MSR 处理后的图像

从图中可以看到,边缘得到有效的保持,亮度均匀性获得明显改善。

3 基于 NSCT 的泡沫图像增强

3.1 非下采样 Contourlet 变换(NSCT)及系数分类

针对 Retinex 处理后的泡沫图像,发现还是很难在亮度均匀性和细节增强上达到平衡,因此本文引入非下采样 Contourlet 方法进行进一步处理。采用变换域 NSCT 进行高频部分的处理,达到增强图像细节信息,消除噪声的目的。

NSCT 是一种多尺度、多方向的完备二维图像表示方法,可以准确地捕捉图像中的边缘轮廓信息和纹理细节信息,适于表达具有丰富细节及方向信息的多传感器图像。

Contourlet 变换滤波器组结构由拉普拉斯塔式滤波器(LP)和方向滤波器(DFB)两部分组成。为了保持 Contourlet 变换的频带分割特性,并使其具有平移不变性,NSCT 去掉了 Contourlet 两级变换中的下采样过程,构造了相应的非下采样滤波器,其结构如图 3 所示。

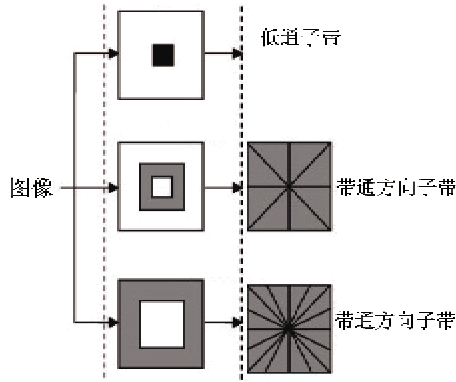


图3 NSCT 的滤波器组结构图

NSCT 包括非下采样的塔形分解 (NSP) 和非下采样的方向滤波器组 (NSDFB) 两部分。首先由非下采样塔式滤波器 (NSP) 把输入图像作尺度分解, 在每个尺度上, DFB 在将分解后得到的带通信号分解到几个带通子带方向上。方向子带的数目可以是 2 的任意次幂, 图 4 为三级理想频带划分。

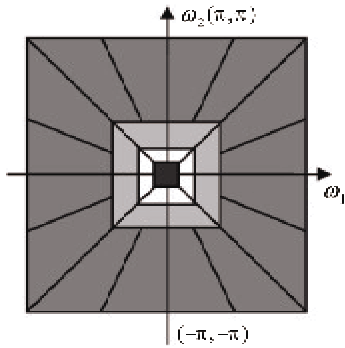


图4 NSCT 的三级理想频带划分

非下采样 Contourlet 变换的图像增强算法是将图像分解为不同尺度上的子带图像, 通过改变各子带的小波系数来完成图像的增强。待增强的图像一般包括图像能量、边缘信息和噪声 3 类信息。对泡沫类型 1 图像进行非下采样 Contourlet 分解, 各子带图如图 5 所示。

对上述变换后的大量系数进行分析发现, 图像的细节信息和噪声主要集中在高频部分, 而图像的能量主要集中在低频子带, 对应于泡沫图像的轮廓边缘部分。细节信息和噪声在不同尺度不同子带方向上有明显不同的分布^[10,14], 其中噪声对应那些具有小幅度值的像素, 强边缘对应着同一尺度所有方向子带中具有大幅值系数的像素, 弱边缘对应于同一尺度下在一部分方向子带中有大幅值但在另一部分方向子带中有小幅值的像素。下面依据这些特性进行分类增强处理。

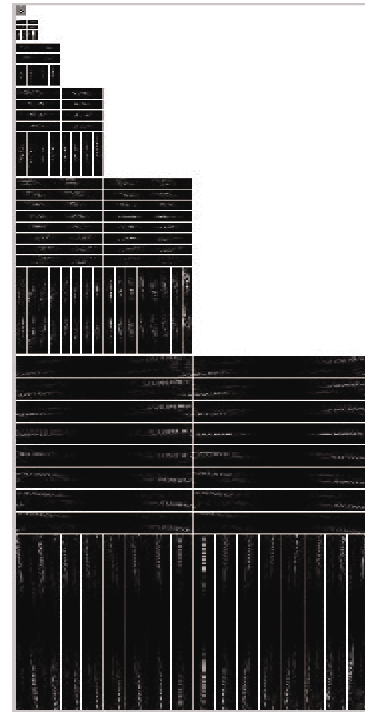


图5 泡沫图像非下采样 Contourlet 变换分解图

3.2 各方向子带处理

对泡沫图像进行非下采样 Contourlet 变换后, 高频子带上各个方向子带的变换系数整体上可以分为边缘信息和噪声。下面讨论图像系数的分类及其处理方法。

对分解后的各高频子带系数, 计算同一层内, 不同子带在同一位置像素点的平均值 $\bar{p}$, 以及所有像素点的最大值 $p_{\max}$, 选取一个合适的阈值可把 NSTC 高频系数进行分类:

$$F(t) = \begin{cases} n, & \bar{p} < cT_{ij}, p_{\max} < cT_{ij} \\ ste, & \bar{p} \geq cT_{ij} \\ wke, & \bar{p} < cT_{ij}, p_{\max} \geq cT_{ij} \end{cases} \quad (6)$$

其中, n 代表噪声, ste 代表强边缘, wke 代表弱边缘, T_{ij} 代表第 i 层、 j 方向上的子带阈值。而 c 是一个 $[1,5]$ 之间的调节参数。 σ 是第一层子带上的噪声方差估计, Donoho 提出了一种通过分析含噪声信号的小波系数来估计噪声方差的方法^[15], 可用公式

$$\sigma = \frac{\text{median}(|x|)}{0.6745} \quad (7)$$

表示。其中, median 表示取中值, x 表示第一层子带上的系数集合。本文中, x 表示为输入图像在 NSCT 域内最小尺度 (分解第一层) 的系数。

分析泡沫图像的子带系数直方图分布, 可知其直方图都具有高尖峰和长托尾特点, 服从广义高斯分布的模型, 因此可以用贝叶斯准则估计阈值。本

文采用基于贝叶斯准则的贝叶斯萎缩法,这种方法能够自适应地处理各子带阈值,比传统的小波阈值具有更理想的萎缩特征。对应于非下采样 Contourlet 域不同尺度下获得各高频子带阈值为

$$T_{ij} = \frac{\sigma_n^2(l)}{\sigma_{i,j}} \quad (8)$$

本文图像增强的目标是放大弱边缘等细节信息,同时抑制噪声,故获得非下采样 Contourlet 变换系数的修正函数为

$$y(t) = \begin{cases} t, & t \in ste \\ f(t), & t \in we \\ 0, & t \in n \end{cases} \quad (9)$$

这里 t 为输入原始图像的变换系数, $f(t)$ 为弱边缘的增强函数。该函数必须满足单调递增、参数可调特性。本文采用改进的 Sigmoid 函数进行系数处理:

$$f(t) = \frac{K}{1 + \exp(-t/a)} - 1 \quad (10)$$

其中, a 取 $[0,1]$ 之间的参数, K 为增强因子。

4 本文算法描述与仿真分析

4.1 本文算法描述

按流程图(图 6)所示,具体算法描述如下:

(1) 对泡沫图像执行区域分割的自适应 MSR 算法,具体包含以下步骤:

① 采用 Otsu 阈值分割方法进行图像分割,获得泡沫顶点区域;

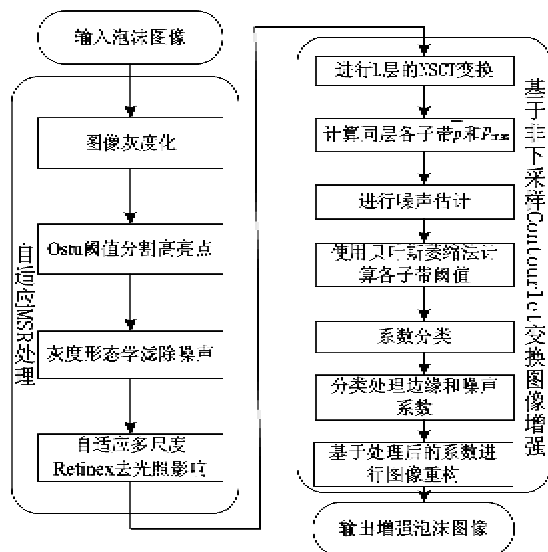


图 6 本文算法流程图

② 采用灰度形态学开闭重构滤波器和平滑滤波器滤除图像中的噪声,并获得较好的区域边界;

③ 针对不同区域采用自适应权值进行多尺度 Retinex 算法,具体包括泡沫顶点区域和边缘区域。

(2) 对泡沫图像进行 L 层 NSCT,具体分解层数 L 视图像而定,得到分解后的低频子带系数和各高频方向的子带系数,根据高频系数特点进行细节增强和去噪。具体包括以下步骤:

① 计算同一层内,不同子带在同一位置像素点的平均值 $\bar{p}$, 以及所有像素点的最大值 $p_{\max}$;

② 采用式(7)进行噪声估计 σ ;

③ 不同子带的贝叶斯萎缩法计算阈值 T_{ij} ;

④ 采用式(6)进行系数分类;

⑤ 按式(9)、(10)完成强边缘、弱边缘以及噪声系数的分类处理。

(3) 利用上述处理后的系数进行图像重构。

4.2 工业图像仿真与分析

图像增强效果的评价主要包括主观评价和客观评价两个方面,对于本文非均匀光照泡沫图像的特点,主观评价即是对图像整体效果和光照不均匀区域的细节信息和亮度的观察^[16]。而客观评价需要衡量全局和局部增强效果。本文选用峰值信噪比 (PSNR)、归一化互相关系数 (NC) 和图像的对比度 (Contract) 作为衡量图像质量的客观标准。

图像对比度的测量函数定义为

$$C_{avg} = \frac{1}{MN} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \phi(m,n) \quad (11)$$

其中 $\phi(m,n)$ 为局部对比度,定义为

$$\phi(m,n) = \frac{A_{\max} - A_{\min}}{A_{\max} + A_{\min}} \quad (12)$$

式中 $A_{\max}$ 和 $A_{\min}$ 分别为增强后低频子带图像的像素点。若图像的局部对比度改善程度越明显,则图像对比度越高。PSNR 的值越大,归一化互相关系数 (NC) 越接近 1 说明图像的质量越好;反之,图像增强效果越差。对图 1 采集的泡沫图像进行处理。实验环境:工作软件为 Matlab R2011b,主机为 AMD Athlon 64 * 2 dual S200 + 2.7GHz,内存为 DDR2-SDRAM 800 MHz 2GB。

改进多尺度 Retinex 算法的试验参数选择为:尺度分别取 15, 80, 200, 权值 w_i 使用区域自适应,在泡沫顶点区域以大、中尺度处理值为主,取 $w_1 = 2/5$, $w_2 = 2/5$, $w_3 = 1/5$, 在边缘区域以中、小尺度为主, $w_1 = 1/5$, $w_2 = 2/5$, $w_3 = 2/5$ 。考虑计算的复杂度和实验所用的浮选泡沫图像的实际情况,NSCT 的

分解级数为 5 级,最粗尺度到最细尺度方向子带分解的数量分别是 3,3,4,5,5;高频分量部分采用分类方法自适应处理,参数验证 $c = 2, a = 0.6, K = 3$ 较好。

为了进一步衡量该算法的性能,将本文提出的

方法与文中两个单一增强方法的结果进行性能对照,仿真结果见图 7。图 7(a) 为泡沫类型 1 采用不同方法增强后的效果图,图 7(b) 为泡沫类型 2 采用不同方法增强后的效果图。

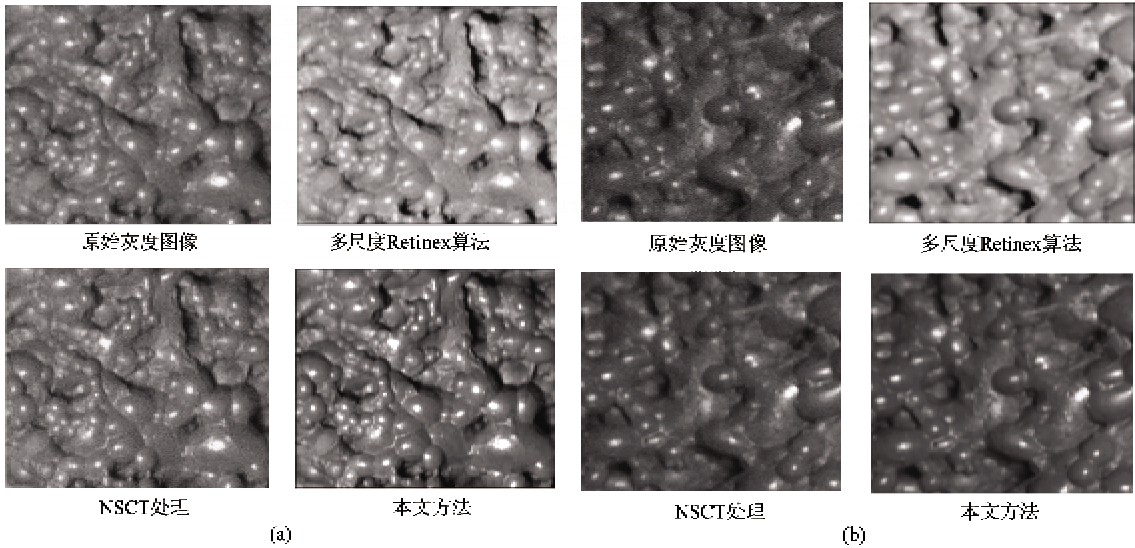


图 7 两幅原始泡沫图像采用不同方法的增强效果

表 1 给出了两幅图像采用不同方法的定量评价指标。

表 1 不同增强方法性能对比			
	多尺度 Retinex	非下采样 Contourlet	本文方法
(a) contrast	0.2415	0.2713	0.3529
NC	0.9951	0.9942	0.9987
PSNR(dB)	22.5614	27.1462	32.7549
(b) contrast	0.2485	0.2537	0.3614
NC	0.9974	0.9931	0.9992
PSNR(dB)	20.7498	22.0451	30.9672

对本文增强方法的实验结果(图 7)和性能对比结果(表 1)的综合分析表明,本文提出的泡沫图像增强方法能够提升泡沫图像的整体亮度均匀性,增强泡沫图像的纹理细节信息,抑制噪声,提高泡沫图像的视觉效果。同其它图像增强方法相比,本文方法能获取更高的 PSNR 和对比度。本文的图像增强方法已经在铝土矿泡沫图像处理中得到应用,结果令人满意。相比单一的多尺度 Retinex 算法虽然能够改善泡沫图像的亮度均匀性,但是不能很好地处理浮选泡沫图像中存在的噪声以及纹理细节,信噪比低,处理后的图像存在局部伪影,多尺度 Retinex

算法处理结果右上边缘部分比较明显(图 7(a))。NSCT 方法可以很好地抑制噪声,增强纹理细节信息,在信噪比和对比度上都有所提高,但对浮选泡沫图像光照影响问题不能有效处理。

5 结 论

浮选泡沫图像的表面视觉特征与浮选过程生产指标密切相关,但由于受浮选现场环境光照,采集设备电磁干扰等多方面影响,造成获取的泡沫图像存在光照不均,对比度低,大量噪声,这些问题严重影响泡沫视觉特征的提取。本文根据浮选泡沫图像特点,提出一种结合多尺度 Retinex 算法和非下采样 Contourlet 变换的泡沫图像增强方法,该方法目前在铝土矿浮选泡沫图像处理中得到了较好的应用,为后续浮选泡沫图像的静态特征、动态特征以及统计特征的提取奠定了基础,也促进了基于图像特征的品位分析和工况识别的准确性。该方法对其它类似工业过程图像处理具有一定借鉴意义。

参考文献

[1] Marais C, Aldrich C. Estimation of platinum flotation grades from froth image data. *Minerals Engineering*, 2011, 24(5):433-441

- [2] Xu C H, Gui W H, Yang C H, et al. Flotation process fault detection using output PDF of bubble size distribution. *Minerals Engineering*, 2012, 26(1): 5-12
- [3] 阳春华, 杨尽英, 牟学民等. 基于聚类预分割和高低精度距离重构的彩色浮选泡沫图像分割. *电子与信息学报*, 2008, 30(6): 1286-1290
- [4] Kaartinen J, Hatonen J, Hyotyniemi H, et al. Machine vision based control of zinc flotation—a case study. *Control Engineering Practice*, 2006, 14(12): 1455-1466
- [5] 牛和明, 陈祥军, 张建勋等. 基于小波变换与反锐化掩模的图像对比度增强. *高技术通讯*, 2011, 21(6): 600-606
- [6] Panetta K A, Wharton E J, Agaian S S. Human visual system based image enhancement and logarithmic contrast measure. *Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics*, *IEEE Transactions on*, 2008, 38(1): 174-188
- [7] 陈文飞, 廖斌, 许雪峰等. 基于 Piecewise 直方图均衡化的图像增强方法. *通信学报*, 2011, 32(9): 153-160
- [8] Mallat S, Zhong S. Characterization of signals from multi-scale edges. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1992, 14(7): 710-732
- [9] 占必超, 吴一全. 基于平稳小波变换和 Retinex 的红外图像增强方法. *光学学报*, 2010, 10(3): 2788-2793
- [10] Do M N, Vetterli M. The contourlet transform: an efficient directional multiresolution image representation. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2005, 14(12): 2091-2106
- [11] Cunha A L, Zhou J P, Do M N. The nonsubsampled contourlet transform—Theory, design, and applications. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2006, 15(10): 3089-3101
- [12] Kimmel R, Elad M, Shaked D, et al. A variational framework for retinex. *Int J Comput Vis*, 2003, 52(1): 7-23
- [13] Jobson D J, Ziaur R, Woodell G A. Properties and performance of a center/surround Retinex. *IEEE Transactions on Image Processing*, 1997, 6(3): 451-462
- [14] Zhou J P, Cunha A L, Do M N. Nonsubsampled contourlet transform: construction and application in enhancement. In: *Proceedings of IEEE International Conference on Image Processing*, Genoa, Italy, 2005. 469-472
- [15] Donoho D. De-noising by soft-thresholding. *IEEE Transactions on Information Theory*, 1995, 41(3): 613-627
- [16] 迟健男, 张闯, 张朝晖等. 基于反对称双正交小波重构的图像增强方法. *自动化学报*, 2010, 36(4): 475-487

Bubble image enhancement based on multi-scale Retinex and NSCT

Li Jianqi^{* **}, Yang Chunhua^{*}, Zhu Hongqiu^{*}, Cao Binfang^{*}

(^{*} School of Information Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083)

(^{**} Communication and Electric Engineering College, Hunan University of Arts and Science, Changde 415000)

Abstract

To solve the problem in mineral flotation that the obtained bubble images are easily influenced by illumination and noises and have the low contrast, an improved image enhancement method based on the multi-scale Retinex (MSR) algorithm and the nonsubsampled Contourlet transform (NSCT) was proposed. The method uses the MSR algorithm for regional adaptive segmentation to enhance the overall brightness uniformity through adjusting the image weight, and then uses the NSCT to process the high frequency coefficients of details and noises by constructing a classification function, aiming to effectively remove the noise and enhance the weak edge, which the Retinex algorithm fails to do. The experimental results confirm the method's positive effects in enhancing image contour, edge and details, curbing noises and improving the overall visual effect to bubble images, which lays a foundation for image feature extraction and mineral grade analysis.

Key words: bubble image, image enhancement, multi-scale Retinex (MSR), nonsubsampled Contourlet transform (NSCT)