

doi:10.16018/j.cnki.cn32-1650/n.201502007

铅浮选泡沫视频图像的物理校正及算法补偿

尚 申

(福州大学 物理与信息工程学院,福建 福州 350000)

摘要:针对铅浮选视频采集图像光照不均、纹理丢失导致难以精确分割的问题,提出了一种用于优化视频图像的物理校正和算法补偿的方法。利用非成像光学理论构建均匀方形光斑自由曲面透镜,在此基础上,提出一种改进的方向波变换图像增强算法,再通过经典的谷底边缘检测算法对其进行分割。结果表明,该方法能有效提高浮选图像的信噪比和对比度,其分割精准度提高了 25%。

关键词:浮选图像;自由曲面透镜;方向波变换;图像增强

中图分类号:TP391.41 **文献标识码:**A **文章编号:**1671-5322(2015)02-0028-07

矿物冶炼浮选时浮选槽内气泡运动速度快,气泡间彼此挤压、堆积,同时受到传统光源光照不均的影响,使浮选不能处在最优运行状态。浮选采集图像时存在大量噪声、图像出现明暗及纹理丢失等问题,导致分割浮选图像的不精确,造成矿物资源的浪费。

近年来,国内外机构和学者对基于机器视觉的取像方法给予高度关注。欧盟于 2000 年投巨资联合芬兰赫尔辛基工业大学、瑞典皇家工学院、奥托昆普公司等多家大学和企业启动了 ESPRIT LTR 项目“基于机器视觉的气泡结果和颜色表征”;智利 Catholic 大学、南非学者等也将机器视觉应用到铂金属、石墨、铜浮选监控中^[1-4];国内中国矿业大学、北京矿业研究院联合金川公司也分别对煤和镍浮选进行了浮选泡沫监测方面的研究^[5-6];中南大学与国内多家大型有色冶炼企业共同合作,搭建了浮选泡沫监测系统^[7]。这些研究者在特定的条件下取像并进行泡沫图像分割获得了较好的结果,但都存在获取图像明暗不均、欠分割等不足。

针对上述问题,本文基于非成像光学理论^[8]提出了一种物理光学校正优化图像的光照不均,采用一种改进的补偿算法对图像阴影和边缘区域进行 2 次改善获得了较理想的取像效果。该方法

首先利用划分网格和非成像光学理论构建方形光斑自由曲面透镜 LED 作为光源;再采用改进的方向波变换的图像增强算法进行优化;最后采用谷底边缘检测算法^[4-9]对所取图像进行验证。

1 方形光斑自由曲面透镜设计

由于 LED 光源具有显色好、功耗少等优点,在浮选照明光源中应用极广^[10]。但常用的 LED 光源为圆形光斑,光效低且不够均匀,本文通过光学原理对光源光线重新分配,设计出方形光斑 LED 光源作为浮选采集图像的照明设备。

目前自由曲面求解方法主要有:剪裁法、划分网格法^[11]和 SMS 法。剪裁法和 SMS 法对浮选点光源均匀照明效果不佳,且求解比较繁琐,设计难度大。本文以非成像光学原理为基础,采用划分网格法设计方形光斑的自由曲面透镜,克服了常规 LED 光源的不足,满足浮选自动化的需要。

1.1 设计原理

对构造的光源选取球坐标系,如图 1 所示。光源位于坐标原点 O,主光轴为 z 轴,沿着 z 轴方向的中心光强为 I_0 , θ 为光线与 z 轴的夹角, φ 为光线在 xoy 平面内的投影与 x 轴的夹角,则光源发出的整体光通量为:

$$\phi = \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^{2\pi} I(\theta) \sin \theta d\theta$$

(1)

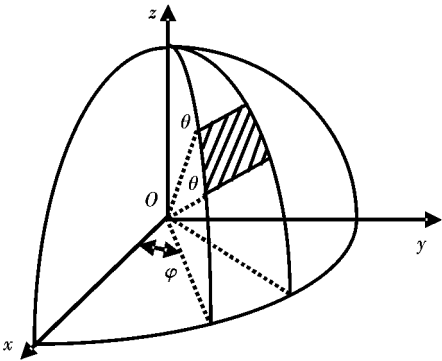


图 1 光源网格划分

Fig.1 Grid division of light source

式中 $I(\theta) = I_0 \cos \theta$ 。

假设被照面的平均照度为 E_v , $1/4$ 方形区域的边长 a , 中心线为 AC , 如图 2 所示。首先, 将 AB 和 AD 等分为 m 份, 将方形的中心线 AC 等分为 n 份, 这样就形成了 $2m \times n$ 个三角形, 对应的光源面被分成 $2m$ 份, 角上被分成 n 份。根据能量守恒定律可得:

$$\int_0^{\pi/2} d\varphi \int_0^{\theta(i)} I_0 \cos \theta \sin \theta d\theta = ab \left(\frac{i}{n} \right)^2 E_v \quad (2)$$

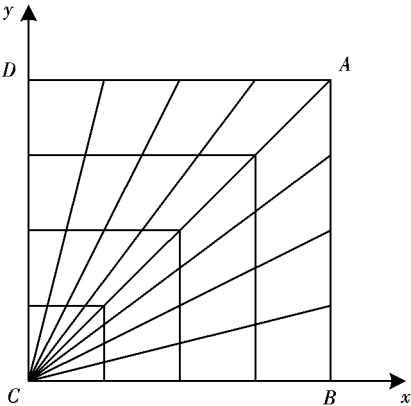


图 2 目标平面网格划分

Fig.2 Grid division of target plane

根据式(2), 就可以得出 θ 值。同样, 根据能量守恒定律有:

$$\int_0^{\varphi(j)} d\varphi \int_0^{\theta(i)} I_0 \cos \theta \sin \theta d\theta = ab \left(\frac{i}{n} \right)^2 \frac{j}{2m} E_v \quad (3)$$

上式中, i 和 j 分别表示在光源面 θ 和 φ 角度内对应的划分个数。根据式(3), 即可得出 φ 值。

如图 3 所示, 根据光源和目标照明的能量对应关系在光源上选择一条初始光线 I_0 , 经自由曲

面折射后对应目标照明面上的初始位置 Q_0 , 选取 $P_0(0,0,Z_0)$ 作为计算的初始点, 光源位于坐标原点。由此可求出入射光方向的单位矢量 I_{in} 和折射光方向的单位矢量 I_{out} , 再由折射定律的矢量公式可求出自由曲面在初始点出的法矢量 p 为

$$p = \frac{I_{out} - n' I_{in}}{[1 + n'^2 - 2n'(I_{out} \cdot I_{in})]^{1/2}} \quad (4)$$

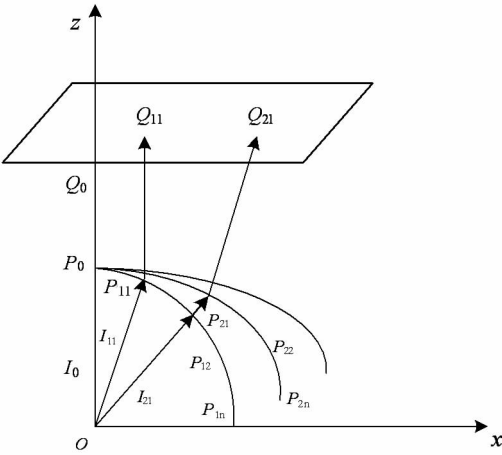


图 3 自由曲面透镜表面生成示意图

Fig.3 Sketch of generating freeform lens surface

式中, n' 为自由曲面介质的折射率, n 为光线与 z 轴夹角平均划分的数量。

由法矢量和初始点坐标可求出过 P_0 点的切平面 T_0 。根据光源和目标照明面的能量对应关系, 可依次求出 P_{12} 到 P_{1n} 点处的切平面, 从而得出第 1 条初始曲线。依此类推, 可以求出第 2 条直至第 $2m$ 条曲线^[12]。

1.2 实例设计

使用传统 LED 与自由曲面透镜 LED 设计实现 $40\text{ cm} \times 40\text{ cm}$ 正方形均匀照明区域, 先用透镜材料为 PMMA, 折射率为 1.49, 光源距目标面的距离 $H = 1\text{ m}$, 照明实例对比如图 4 所示。

通过分析可知, 本文设计的自由曲面透镜对光线进行了重新分配, 使接收面的方形光斑更均匀。使用专业光学软件 TracePro 经过 200 万条光线追迹模拟, 得出光能利用率为 0.923, 比使用普通光源照射提高了 21.43%。

2 基于改进方向波变换图像补偿算法

对 LED 光线的重新分配, 使 CCD 摄像机能直接获取较为均匀的泡沫图像, 再通过图像增强

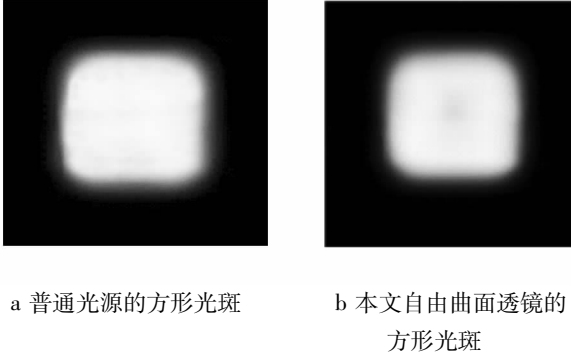
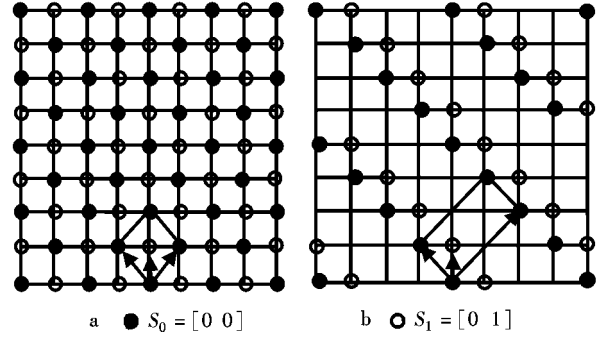


图 4 普通光源与本文设计的自由曲面透镜光斑对比

Fig. 4 Flare contrast for ordinary light and light of this design

图 5 $f_{\text{SAWT}}(2,1)$ 变换的采样格示意图Fig. 5 Schematic diagram of $f_{\text{SAWT}}(2,1)$ transform based on sampling lattice

算法对泡沫图像进行处理,大大地提高分割的精准性。中南大学李建奇等提出了一种基于改进方向波变换和多尺度 Retinex 算法^[13-15]的浮选泡沫图像增强方法。用改进方向波变换对浮选泡沫图像进行分解,保证信号产生平移不变性,避免图像边缘模糊;引入多尺度 Retinex 算法能够实现图像增强效果,改善其亮度均匀性,有效地显示淹没在阴影区域中的细节。

2.1 方向波变换

方向波变换是一种全新的图像表示工具,包含滤波采样和各向异性小波分解 2 个部分,分别表示沿向量 $\mathbf{d}_1$ 与 $\mathbf{d}_2$ 方向进行 n_1 次与 n_2 次滤波和采样的处理过程。其奇函数为 $f_{\text{SAWT}}(M_A, n_1, n_2)$, 其中:

$$M_A = \begin{bmatrix} a_1 & b_1 \\ a_2 & b_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_1 \\ d_2 \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中: a_1, a_2, b_1, b_2 均为整数。图 5 显示了 $f_{\text{SAWT}}(2,1)$ 分解时对应的采样栅格, S_0 和 S_1 均为移动向量,沿着斜率为 $r_1 = b_1/a_1$ 的向量 $\mathbf{d}_1$ 称为变换方向(图 5a 为 45°),沿着斜率为 $r_2 = b_2/a_2$ 的向量 $\mathbf{d}_2$ 称队列方向(图 5b 为 -45°)。采样格由采样矩阵 M_A 决定, $M_{A'} = D_s \cdot M_A$, D_s 为水平方向上的亚采样

$$M_A = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix}; \quad M_{A'} = \begin{bmatrix} 2 & 2 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

方向波变换是各向异性的,它能在不连续处提供非常紧凑的表达,其变换和队列方向的滤波和采样次数并不相等。同时,方向波变换的各向异性基函数在不连续处产生的系数非常稀疏,因此方向波变换能够更加有效的表示图像中的轮廓

和边缘。分析工业现场获取泡沫图像的灰度直方图,其像素灰度分布比较集中,95% 在灰度 150 ~ 200 处。针对以上问题,引入 Retinex 边缘增强方法,以改善图像亮度均匀性,提高图像质量。

2.2 Retinex 增强算法

经典的 MSR 算法的数学形式为多个 SSR 处理结果的加权平均:

$$R_{M_i}(x, y) = \sum_{n=1}^{N'} w_n R_{n_i}(x, y) \quad (7)$$

$$R_{n_i}(x, y) = \log I_i(x, y) - \log [F_n(x, y) \cdot I_i(x, y)] \quad (8)$$

其中, $R_{M_i}(x, y)$ 是 MSR 在第 i 个颜色谱段的输出; N' 为尺度个数; w_n 为对应尺度的权值; $R_{n_i}(x, y)$ 是第 i 个颜色谱段在不同尺度的输出分量^[16]。

经典的 MSR 算法在增强图像时,采用常数增益会导致图像的平滑区域和高对比度边缘增强过度,在高对比度边缘出现晕环,同时泡沫阴影区域细节没有明显改善。本文针对 CCD 摄像机直接获取泡沫图像的特点,分析阴影区域 Retinex 输出特点,改进增益函数,即对不同区域采用不同增益,高对比边缘区域采用小增益,阴影区域采用较大增益。同时,整体图像效果由大高斯环绕尺度反映,因此,应该用较小增益差;而图像的阴影局部细节由小高斯环绕尺度反映,应具有较大增益差。本文采用的空间变化增益数学表述形式如下:

$$g_{n_i}(x, y) = \left[k_1 \frac{2}{b} N R_{n_i}(x, y) \cdot \exp(-k_2 \cdot N R_{n_i}^2(x, y)/b) + 1 \right]^{1-c_n} \quad (9)$$

式中, k_1 、 k_2 、 b 为常数因子,用于增益的变化曲线; $NR_{n_i}(x,y)$ 指归一化的 Retinex 输出 $R_{n_i}(x,y)$; $\overline{c_n}$ 指归一化的高斯环绕函数的尺度常数。 $NR_{n_i}(x,y)$ 、 $\overline{c_n}$ 分别定义为:

$$NR_{n_i}(x,y) = \frac{|R_{n_i}(x,y)|}{|R_{n_i}|_{\max}} \tag{10}$$

$$\overline{c_n} = \frac{c_n}{c_{\max}} \tag{11}$$

式中, $|R_{n_i}|_{\max} = \max \{|R_{n_i}(x,y)|\}$, $c_{\max} = \max\{c_n\}$ 。

由式(9)、(10)、(11)计算增益函数后,改进的 MSR 算法的数学形式为:

$$R_{M_i}(x,y) = \sum_{n=1}^N g_{n_i}(x,y)R_{n_i}(x,y) \tag{12}$$

3 实验结果

将自由曲面透镜 LED 光源应用在福建金东矿业铅浮选槽上,使用维视型号为 MV - VB200FC 彩色 CCD 相机进行试样图像采集,随机选取 3 幅泡沫图像进行对比,如图 6 所示。由图 6 可以看出,图像的均匀性有了较大的改善,为此,对比度有了进一步提高;同时也发现在小气泡聚集多和泡沫起伏变化大的地方出现了很多阴影,导致此部分区域泡沫表面纹理细节丢失,顶部高亮点数量减少。为此,使用改进的方向波变换结合多尺度 Retinex 算法对图像进行增强处理。图 7 为 3 幅图像增强后效果,在整体均匀性进一步优化同时,图像阴影区域细节增强,提高了图像的质量,增加了图像分割阶段的精准度。

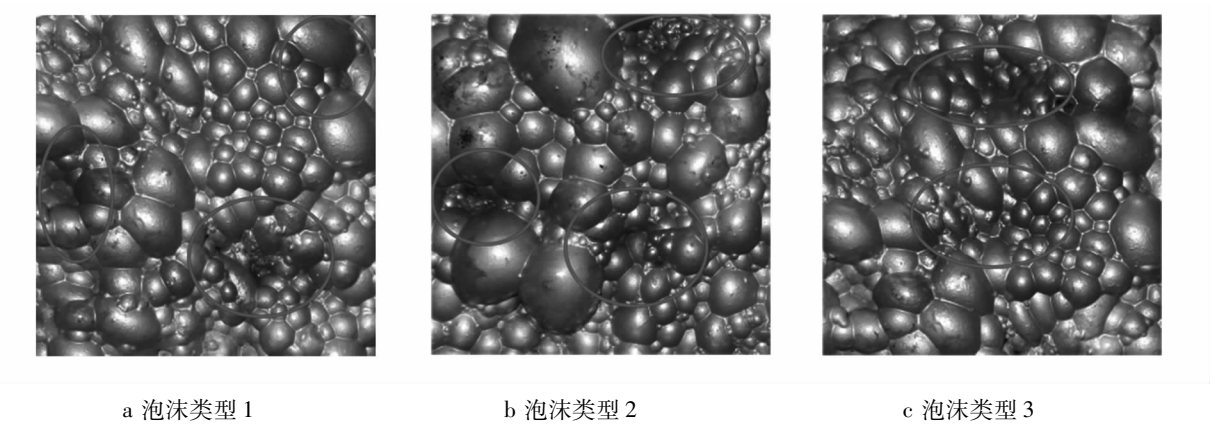


图 6 使用方形光斑自由曲面透镜 LED 作为照明光源所获取的图像
Fig.6 The image acquired using a square spot free curved lens LED light

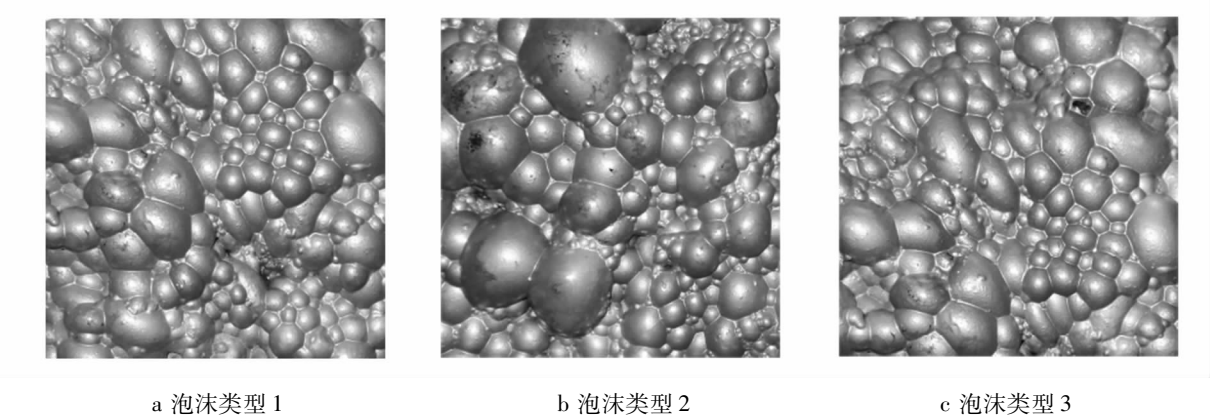


图 7 改进的方向波变换处理后的图像
Fig.7 The image be processed by the transformation

为了定量地评价图像增强的效果,选用图像的对比度(Contrast)和信噪比(SNR)对增强效果进行客观评价^[17]。图像对比度的测量函数定义为

$$C_{\text{avg}} = \frac{1}{MN} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \varphi(m,n) \tag{13}$$

$$\varphi(m,n) = \frac{A_{\text{max}} - A_{\text{min}}}{A_{\text{max}} + A_{\text{min}}} \tag{14}$$

式中 A_{max} 和 A_{min} 分别为以 $\varphi(m,n)$ 为中心的 3×3 窗口内的灰度最大值和最小值。

表 1 给出 3 幅泡沫图像增强后的各项定量指标。由表 1 可见,采用改进的方向波变换处理后的图像在对比度和信噪比方面都有显著的提升。图 8~图 10 为 3 种泡沫类型通过不同方法获得的图像。

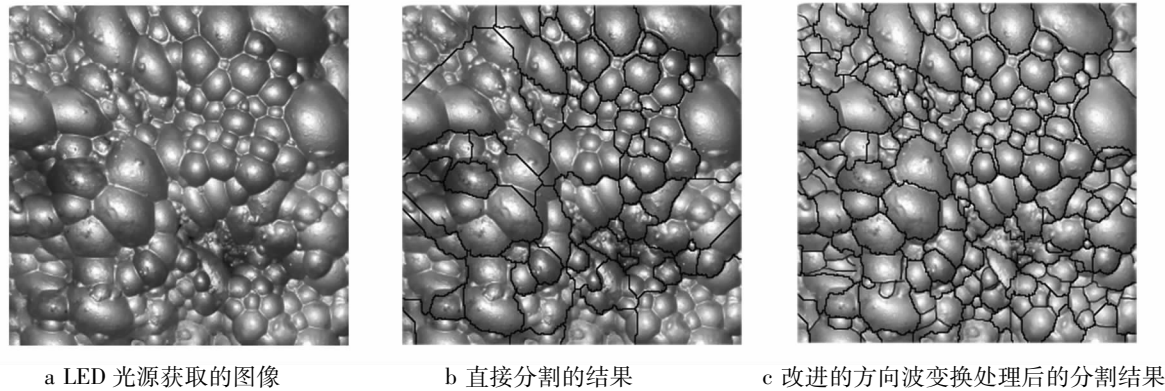


图 8 泡沫类型 1
Fig.8 Foam type 1

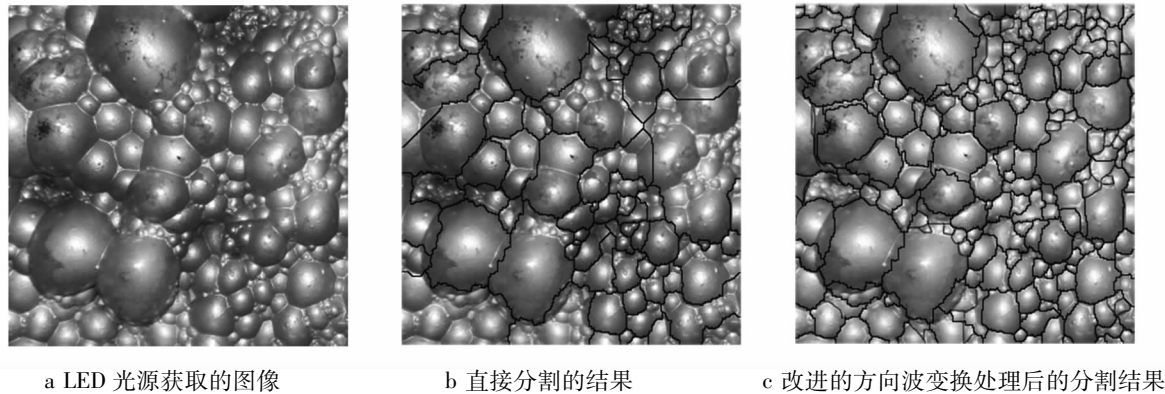


图 9 泡沫类型 2
Fig.9 Foam type 2

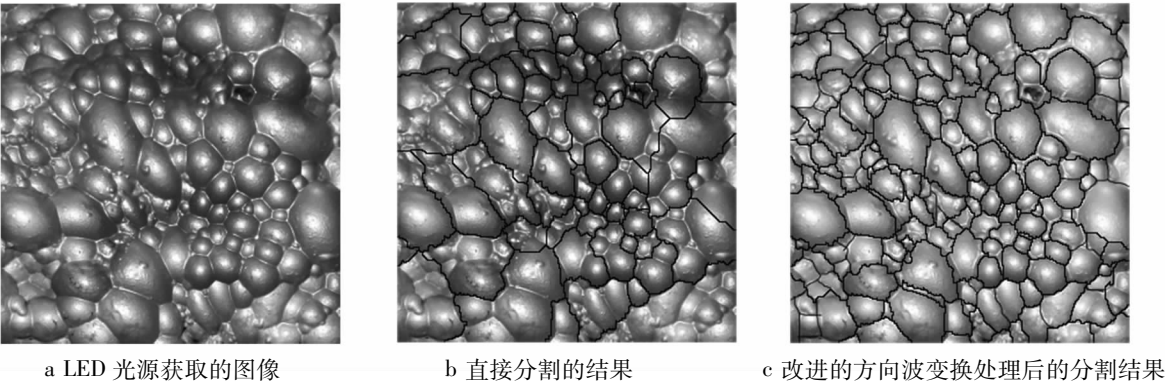


图 10 泡沫类型 3
Fig.10 Foam type 3

表 1 泡沫图像增强的各项定量评价
Table 1 Quantitative evaluation of froth image enhancement

图像	泡沫类型 1		泡沫类型 2		泡沫类型 3	
	对比度	信噪比	对比度	信噪比	对比度	信噪比
原图	0.246	8.163	0.202	7.523	0.224	8.459
增强图像	0.286	13.758	0.272	13.325	0.294	14.553

表 2 铅浮选泡沫分割气泡数对比

Table 2 The number of bubbles of Lead divided

类型	直接分割 气泡数	图像增强后的 分割气泡数	人工分割 气泡数
泡沫类型 1	87	134	139
泡沫类型 2	72	126	132
泡沫类型 3	91	139	143

表 3 铅浮选泡沫分割统计白点数对比

Table 3 The number of white point of Lead divided

类型	直接分割统计 白点数	图像增强后的 分割统计白点数	人工分割 统计白点数
泡沫类型 1	91	145	139
泡沫类型 2	82	129	133
泡沫类型 3	98	143	143

谷底边缘检测算法以其运算速度快、精度高和内存资源占用少等特点,普遍应用于浮选泡沫图像分割中。该算法是将像素按灰度值展开,灰度值较低的像素点构成了气泡的边缘,每个气泡的边缘具有不同的灰度值,构成谷底分布。运用谷底检测算法将边缘识别,从而进行气泡的精确

分割。表 2、表 3 为采用不同方法进行分割气泡数、统计白点数对比。

4 结论及后续研究

(1)提出了一种基于非成像光学理论对自由曲面透镜 LED 光源光线的重新分配,获得了均匀光照的方形光斑,使直接获取的图像均匀性得到明显提升,纹理细节更加丰富。

(2)由于浮选泡沫图像像素灰度分布比较集中,使得小气泡集聚和泡沫波动大的区域依然会产生阴影。

(3)提出了一种改进的方向波变换结合多尺度 Retinex 补偿算法。该方法能在不连续处提供非常紧凑的表达;同时,方向波变换的各向异性基函数在不连续处产生的系数非常稀疏,能够更加有效的表示浮选泡沫边缘。

(4)在分析阴影区域 Retinex 输出特点的情况下,改进增益函数,即高对比边缘区域采用小增益,阴影区域采用较大增益。

(5)实验结果表明,以自由曲面透镜 LED 为光源获取的直接泡沫图像,均匀性和纹理细节都有较为明显的提升;同时对泡沫边缘不清晰区域进行补偿算法处理,提高了泡沫边缘区域和强对比区域的图像质量。

(6)后续研究,下一步工作将对不同矿种进行测试优化,并分析浮选药剂的加入量与光照系统取像调整间的关系。

参考文献:

[1] Bonifazi G, Giancontieri V, Meloni A, et al. Characterization of the flotation froth structure and color by machine vision (ChaCo) [J]. Developments in Mineral Processing, 2000, 13 (8) : 39 - 49.

[2] Wang W X, Stephansson O, Wang S C. On - line system setup in a cellar of a flotation plant [C]. Proceedings of the 15th International Conference on Pattern Recognition. Barcelona: IEEE, 2000: 791 - 794.

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

[4] Cipriano A, Cuarini M, Vidal R, et al. A real time visual sensor for supervision of flotation cells [J]. Minerals Engineering, 1998, 11 (6) : 489 - 499.

[5] Wang Yong, Yang Gongxun, Lu Maixi, et al. The gray run length and its statistical texture features of coal flotation froth image [J]. Journal of China Coal Society, 2006, 31 (1) : 94 - 98.

[6] Zeng Rong. Study of edge detection methods on Flotation froth image [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2002, 31 (5) : 421 - 425.

[7] Gui Weihua, Yang Chunhua, Xie Yongfang, et al. Mineral Flotation Froth Image Processing and Process Monitoring Technique [M]. Beijing: Science Press, 2013: 11 - 17.

[8] 罗毅, 张贤鹏, 王霖, 等. 半导体照明中的非成像光学及其应用 [J]. 中国激光, 2008, 35 (7) : 963 - 971.

- [9] Wang W, Bergholm F, Yang B. Froth delineation based on image classification[J]. Minerals Engineering, 2003, 16(11): 1 183 – 1 192.
- [10] Eichhorn K. LEDs in Automotive Lighting[J]. SPIE, 2006, 6 134: 1 – 6.
- [11] 李梦远, 韩姗, 李柏承, 等. LED 路灯矩形均匀照明方法综述[J]. 激光杂志, 2014, 35(10): 14 – 18.
- [12] 张康, 苏成悦, 王维江, 等. 均匀照明方形光斑的 LED 自由曲面透镜设计[J]. 照明工程学报, 2014, 25(1): 82 – 88.
- [13] 李建奇, 阳春华, 朱红求, 等. 基于改进方向波变换的泡沫图像增强新方法[J]. 中南大学学报, 2013, 44(3): 1 030 – 1 036.
- [14] Tarel J, Hautiere N, Caraffa L, et al. Vision enhancement in homogeneous and heterogeneous fog[J]. IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine, 2012, 4(2): 6 – 20.
- [15] Nishino K, Kratz L, Lombardi S. Bayesian defogging[J]. International Journal of Computer Vision, 2012, 98(3): 263 – 278.
- [16] 赵晓霞, 王汝琳. 改进的多尺度 Retinex 算法及其应用[J]. 计算机工程, 2011, 37(6): 209 – 211.
- [17] 占必超, 吴一全, 纪守新, 等. 基于平稳小波变换和 Retinex 的红外图像增强方法[J]. 光学学报, 2010, 30(10): 2 788 – 2 793.

Optical Correction and Compensation Algorithm for Flotation Image

SHANG Shen

(School of Physics and Information Engineering, Fuzhou University, Fuzhou Fujian 350000, China)

Abstract: As flotation images are difficult to segment due to the existence of uneven illumination, texture loss, a method of physical correction and compensation algorithms for image acquisition of lead flotation is developed. In this method, first, to construct the free-form surface lens based on the non-imaging optics theory is performed to improve the optical efficiency of the lens and the light source uniformity. Then, an improved directionlet transform image algorithm is proposed to increase the brightness in the small foam and to enhance the texture detail by analyzing the Retinex output characteristics of the shaded area and improving the gain function. Experimental results show that the method can improve flotation image SNR and contrast and the segmentation accuracy improved 25% by the classic bottom edge detection algorithm.

Keywords: flotation image; free curved lens; image enhancement

(责任编辑: 张英健)