

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

阳春华 杨尽英 牟学民 周开军 桂卫华

(中南大学信息科学与工程学院 长沙 410083)

摘要: 该文针对矿物浮选过程泡沫图像质量不理想、气泡大小形状灰度不均的问题,提出一种基于聚类预分割和高低精度距离重构的泡沫图像分割方法。首先,利用 k -均值聚类进行前景泡沫与背景矿浆彩色图像分割,依据灰度分布和形状分布特征对提取到的泡沫图像进行滤波;然后,基于形态重构提出结合高低精度距离变换对距离图像进行重构,同时利用面积重构 h 顶改进变换为分水岭变换提取准确的特征标识;最后利用分水岭算法得到分水线,从而完成浮选泡沫的分割。由分割后的泡沫图像可统计分析出气泡个数与尺寸等物理特征参数从而为浮选控制提供依据。仿真结果表明了方法的有效性。

关键词: 泡沫图像; k -均值聚类; 面积重构; 距离变换; 分水岭变换

中图分类号: TP391.41

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2008)06-1286-05

A Segmentation Method Based on Clustering Pre-segmentation and High-low Scale Distance Reconstruction for Colour Froth Image

Yang Chun-hua Yang Jin-ying Mou Xue-min Zhou Kai-jun Gui Wei-hua

(School of Information Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: Due to a large variation in the quality of froth images of ore and inhomogeneity of size, shape and grayscale of bubbles, a new segmentation method based on clustering pre-segmentation and high-low scale distance reconstruction is proposed for froth images. Firstly, the segmentation between foreground froth and background mineral slurry image is achieved by the k -means clustering method and the noises are filtered according to intensity distribution and shape distribution information, and a new reconstruction combined with high-low scale distance transformation based on morphological reconstruction is presented and applied to the froth distance-transformation image. Then the precise region makers for watershed transformation are extracted by area-reconstruction h -dome improved transformation. Finally, the watershed algorithm is used to get waterline for every bubble. Bubble physical characteristics such as the bubble number and bubble size can be obtained from the segmented image, which provide the guidance for flotation control process. The experimental results show its effectiveness.

Key words: Froth image; k -means clustering; Area-reconstruction; Distance transformation; Watershed transformation

1 引言

在矿物浮选生产中,浮选质量与泡沫特征参数密切相关,如泡沫颜色反应矿物类型,气泡尺寸和形状反应携带矿物总量,而根据泡沫的绽开度可预测工艺状态。目前,矿物浮选过程一般由有经验的操作工人通过观察浮选槽表面泡沫的视觉信息来完成浮选过程的操作,但由于操作人员的轮换、人工操作的不确定性和随意性,难以保证浮选过程的优化运行。

计算机技术的快速发展促进了数字图像处理技术在浮

选泡沫图像处理中的应用。在南非已利用图像处理进行铜矿浮选管理专家系统^[1],芬兰 Pyhasalmi 锌矿已采用基于计算机多视觉的专家控制器来优化锌浮选回路^[2],使得年利润增加 20-30 万欧元,国内金川公司利用图像分析技术实现了镍选矿的浮选状态监控。但国内外关于轻金属的浮选泡沫的图像分析基本上是一片空白,因而进行轻金属浮选泡沫图像处理技术的研究具有重要意义。

图像处理和计算机视觉中,图像分割是图像分析的关键技术,该技术已广泛应用于医学图像、卫星图像、自动导航等领域。对于浮选泡沫图像处理而言,泡沫图像分割是获取气泡大小、速度、稳定度等泡沫物理特征参数的核心。浮选泡沫图像中气泡之间灰度值变化小,气泡中部灰度变化大,基于灰度相似的分割方法易造成过分割和欠分割,若采用经

2006-12-15 收到,2007-07-13 改回

国家自然科学基金重点基金(60634020)和博士点基金(20050533016)资助课题

典的边缘检测算法能分割出大部分气泡亮点，但气泡边缘信息丢失。因此浮选泡沫图像分割很难使用基于像素灰度值的经典技术，这给图像分割带来了困难，目前，还没有一套标准的分割算法。Moolman, Aldrich 等人采用灰度阈值法^[3]提取气泡中心的亮点来预测泡沫大小分布，该算法简单，但随着泡沫图像质量的恶化，其性能下降，鲁棒性差；Sadr-Kazemi, Cilliers 提出分水岭算法分割煤浮选泡沫^[4]，该方法受气泡亮点的影响易造成过分割，且对于较小的气泡分水岭分割法的效率迅速降低，其形状信息不再可靠；文献^[5]采用基于流域的边缘探索法分割泡沫图像，该方法对图像质量要求高，其准确性很大程度受气泡类型的和光照条件的影响。由于轻金属矿石颗粒小、极轻使得浮选泡沫表面亮点不均，同时浮选现场恶劣，浮选过程和光照条件的变化使得泡沫图像质量不高，因此以上提及的泡沫分割方法很难应用于轻金属浮选泡沫图像。

本文针对浮选泡沫图像特征和现有泡沫分割算法的局限性，在文献^[4]的基础上，提出一种轻金属浮选泡沫图像分割的方法。第一，利用 k -均值聚类估计气泡与背景像素的分布，提取出气泡图像；第二，采用形态学开运算和面积重构操作对图像进行预处理；第三，用 Ostu 算法进行二值分割，同时采用本文所提出的新的重构方法求二值图像的距离变换图；第四，基于 h -顶开重构的改进变换为分水岭变换提供标识点从而完成泡沫图像的分割。该方法通过聚类和距离重构解决了以气泡亮点作为种子点可靠性不高的问题，兼顾灰度分布和形状分布特征对浮选气泡进行分割，克服现有泡沫分割方法单一性和对图像要求严格的缺点。实验结果表明，该分割方法能够准确地完成轻金属的浮选气泡分割，为浮选控制提供重要的泡沫特征参数。

2 气泡图像的提取

分析某轻金属不同形态泡沫图像的灰度直方图，发现其形态较为单一，多为单峰，且像素灰度分布比较集中，95% 在灰度 150-200 处，因此背景矿浆和前景泡沫的灰度值对比度低；且浮选现场中标准的背景图像难于采样，使得无法利用经典的差影算法和阈值分割法提取前景泡沫图像。针对该问题，本文用 k -均值聚类的方法^[6]粗略估计分别属于气泡表面、气泡顶点和背景中的像素，使泡沫图像与背景像素得到更好的分离，该方法在传统的亮度信息的基础上，引入色差信息作为预分割的参考，取得了较好的预分割效果。

k -均值聚类属于无监督迭代优化算法的范畴。核心思想是通过迭代把数据对象划分到不同的簇中，以求目标函数最小化，通常采用的目标函数的形式为平方误差准则函数。由于 $L \times a \times b$ 彩色空间为均匀色标体系，空间中两点距离的大小所表示的色差与人区分颜色差别的感受一致，因此用 k -均值聚类算法对泡沫图像颜色聚类时，需将 RGB 色度空间转化为 $L \times a \times b$ 彩色空间。

图 1(a) 是采样的某轻金属浮选泡沫图像，可以大致区分到 3 种颜色的像素，分别为背景像素、气泡表面的像素和气泡顶点像素，对采样的泡沫图像在 $L \times a \times b$ 色度空间中进行 k 为 3 的均值聚类，分别获取到背景聚类、泡沫边缘与泡沫顶点聚类的图像，图 1(b) 是利用不同的灰度标记了 k -均值聚类获得的不同类别。浮选泡沫图像分割的对象为泡沫图像中的气泡，因此将泡沫边缘和泡沫顶点聚类的像素归为一类像素，图 1(c) 是聚类后的泡沫灰度图像。图 1 表明利用 k -均值聚类自动分割泡沫颜色区域，使得气泡图像能有效地与背景矿浆图像分离，解决了泡沫图像气泡难于提取的问题。

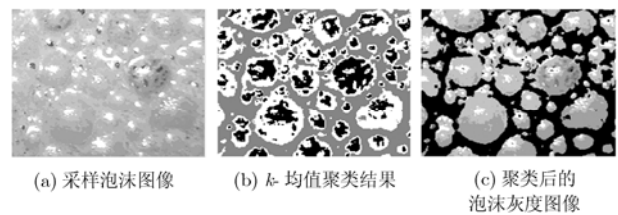


图 1 气泡图像提取

3 图像预处理

3.1 聚类结果的预处理

浮选现场环境恶劣、光照强度不均及矿浆的光线反射使得泡沫与矿浆之间均存有亮点，导致 k -均值聚类将背景矿浆像素聚类为前景气泡像素，通过形态学的开运算对聚类后的泡沫图像进行修正，可以剔除掉被误聚类为前景气泡像素，使得气泡的轮廓变的光滑，在一定程度上降低了图像噪声。进行开运算时，结构元素选取要适中，若选取过大会消除小气泡，过小则不能剔除掉被误聚类为前景气泡像素，影响气泡分割的准确率。图 2 是选取结构元素为 3×3 的椭圆状对图 1(c) 进行开运算后的泡沫图像，经开运算后泡沫图像变得光滑且噪声减少。

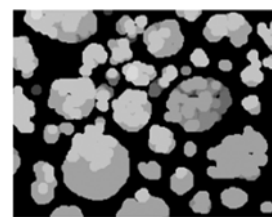


图 2 开运算后的泡沫图像

3.2 基于面积重构开闭操作除噪

噪声是导致图像退化的重要原因，不进行去噪声预处理，对进一步的图像分析和识别造成极大的影响，甚至无法进行处理。由于无封闭实验摄像系统，浮选泡沫图像的摄取是在自然光和白炽灯下进行的，使实际获取的泡沫图像噪声较大，而且存在大量阴影。

传统的预滤波处理采用 Gauss 平滑滤波器消除噪声和细节,但容易使重要的轮廓信息模糊甚至丢失,造成最终的区域轮廓位置偏移。形态学开闭滤波器具有良好的去除细节和噪声特性,但其操作只关注了图像特征的大小,而忽视特征的形状,使得图像的形状出现扭曲变形。为了在消除噪声的同时尽可能地保留图像特征的边界和物体形状的完整性,本文采用面积重构操作实现图像滤波,该重构滤波器满足特征的形状和大小要求。

面积重构是形态重构和面积滤波的改进算法,其算子属于连通算子范畴,满足单调递增、幂等($\psi^2 = \psi$)特性,是一类基于完备格理论的形态滤波算子^[7]。其以连通面积大小作为滤波的准则,利用灰度信息对图像进行形态重构^[8],在滤除干扰的同时,较好地保留物体的几何特性。 h 开重构中标识图像 g 满足: $\forall p \in D, g(p) = f(p) - h$, h 为指定的常数; 则 h -开重构 top-hat 变换,即 h -顶开重构变换: $m(p) = f(p) - \rho(p)$, 其中 $\rho(p)$ 为 h -开重构的结果,该变换能依据灰度差 h , 有效地根据面积和对比度大小提取图像的峰值区域,为分水岭算法提供准确的标识。

图 3 是一维信号灰度重构滤波的示意图(采样位置与灰度值是无量纲),其中取输入信号 f 为掩模,取标识 $g = f - 10$,面积阈值 $S = 8$,图 3(b), 3(c)中的实线部分代表结果。可见面积重构克服了形态重构不能滤除尖峰干扰的缺点(峰 a, c)。与面积滤波相比,则具有消除大面积低灰度区域低灰度区域(峰 b)的优点。形态重构是面积阈值 $S = 1$ 时的特例,当 $g = f$ 时面积重构算子将简化为面积滤波。利用对偶特性可知面积重构的闭操作是对图像的背景(波谷)进行滤波。因此面积重构开、闭运算在保持目标信息完整性及位置不变的前提下,达到同时消除图像中明暗细节和噪声的目的,同时保留下来的区域轮廓也不会发生位置偏移。

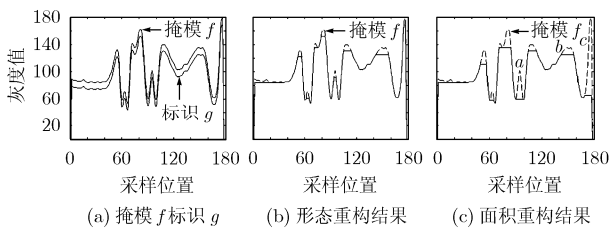


图 3 一维信号灰度重构滤波

基于上述面积重构的优点,运用面积重构开、闭重构运算对提取到的气泡灰度图像 f 除噪。浮选泡沫图像中,一般认为像素少于 3 的连通区域是噪声,同时大量的浮选气泡形状近似于椭圆状,为此须选取椭圆状的结构元素以避免滤波后的泡沫图像的气泡变形。本文实验所采用的结构元素 B 为 3×3 椭圆状,面积阈值 $S = 3$,实现步骤如下:

(1)以 $g = f \circ B$ 为标识图(\circ 表示开运算操作),对掩模图像 f 进行面积开重构,输出图像为 f_o 。

(2)以 $g = f_o \bullet B$ 为标识图(\bullet 表示闭运算操作),对图像 f_o 进行面积闭重构,输出图像为 f_{oc} 。

由图 4 可以看出,泡沫灰度图像 f 经过上述开闭重构滤波后,亮的噪声减弱,光滑边缘和内部区域基本上改善,同时很好的保留了气泡的几何特征。

4 泡沫图像二值化与距离变换

4.1 二值化分割

Ostu 算法是一种常用的分割方法,它基于使类间方差最大的原理,选取最佳门限将图像的灰度直方图分割成两部分,使两部分的分离性最大,具体算法见文献[9]。采用 Ostu 算法对图像进行二值分割,对比图 4 和图 5,经过二值化分割后使得背景像素和前景像素得到了很好的分离,进一步消除了图像的暗背影,但此时的分割比较粗糙且没有把黏连在一起的气泡有效的分割开来,需通过求取距离变换图像并对其进行分水岭变换得到精确的分割。

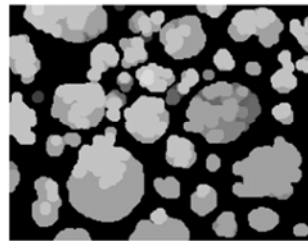


图 4 面积重构开闭运算后的图像

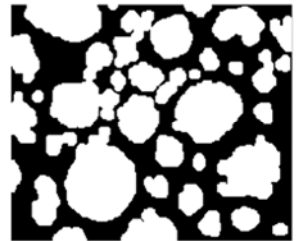


图 5 Ostu 阈值分割图

4.2 图像的距离变换及其灰度重构

距离变换是一种将二值图像转换成灰度图运算,用 X 代表二值图中的前景集合, X^c 代表背景点集合,则 $(f(x) = \min(\text{distance}(x, y), x \in X, y \in X^c))$, 每个像素的灰度级是该像素与距其最近的背景间的距离。采用不同的距离关系,可得不同精度的距离灰度图像,高精度的数字空间距离对干扰信号敏感,对锁定标识点区域并非更好,但其精确的距离可以提高分水岭边界定位精确度,这是由于精确的距离可以增加距离灰度图中的灰度层次。为了减小分水岭分割的过分割程度,结合使用高低精度变换图提出了一种新的方法对距离变换图像进行重构。

具体过程如下:

(1)采用不同的距离关系将二值图像转化成高精度距离灰度图 f_1 和低精度距离灰度图 f_2 ;

(2)利用 h -顶开重构变换从低精度距离灰度图 f_2 中提取极大值区域形成灰度重构标识图 g ;

(3)根据标识图 g 对高精度距离灰度图 f_1 进行灰度重构,则可以得到后续分水岭分割的参考图像。

利用上述算法求二值图像距离变换图,首先分别采用了八邻域的 7: 5 的距离关系(对角距离为 7, 四邻域距离为 5)和 1: 1 的距离关系求高低精度距离灰度图 f_1 和 f_2 , 对 f_2 进

行 h -顶开重构变换提取标识点, 选取参数 $h = 1$; 然后利用所提取的标识点对 $7:5$ 距离灰度图 f_i 进行灰度重构, 图 6 是重构后的距离变换图。在求标识点时需注意, 合理的 h 值可以合并细节、消除干扰, 但 h 过大造成不同区域错误地合并; 不过实验发现对结果而言 h 是一个取值允许范围比较宽松的参数, 但是对计算速度会有影响, h 越大, 计算量越大, 所以一般选取 h 不易过大。

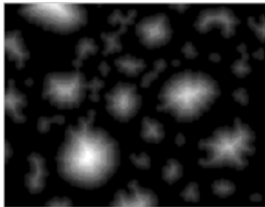


图 6 重构后的距离变换图像

5 分水岭分割

分水岭算法^[10]是新近发展起来的数学形态学图像分割方法, 将像素的灰度值看作海拔高度, 不同灰度值的区域对应于山峰和山谷盆地, 盆地的边缘就是所谓的分水岭, 其应用的难点在于需要预先为每个物体确定准确的种子点。由于待分割的浮选气泡形状的多样性以及图像噪声等原因, 利用形态学中的极限腐蚀或 top-hat 变换等传统方法往往不能为每个浮选气泡提供唯一的种子, 易产生过分割; 本文以重构后的距离变换图像为拓扑表面, 距离变换图中的最小值对应山峰, 最大值对应山谷, 用 h -顶开重构的改进变换求取距离图像的各项区域, 其标识点作为分水岭变换的种子区域, 解决种子点难以确定的问题。

h -顶开重构的变换能够提取出所有的峰值区域, 同时将小面积和低对比度的相邻区域合并, 而 h -顶开重构的改进变换是在 h -顶开重构变换基础上, 根据面积要求, 进一步限定峰值区域, 将小于面积峰视为干扰加以滤除, 将单个面积小于阈值、面积和大于阈值的相邻区域加以合并, 其实现过程需进行面积重构 h 开操作和面积重构 h 开变换各一次, 其抗干扰能力强, 图 7 表明其标识点可以为气泡准确分割提供标识。

根据求取的标识点图对重构后的距离灰度图采用分水岭算法得到分水线, 准确地完成气泡的分割(图 8)。为了对比分割效果, 采用其他方法对泡沫进行分割如图 9, 其中图

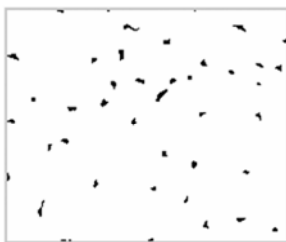


图 7 分水岭分割的标识

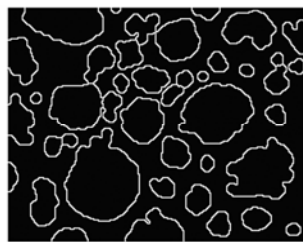
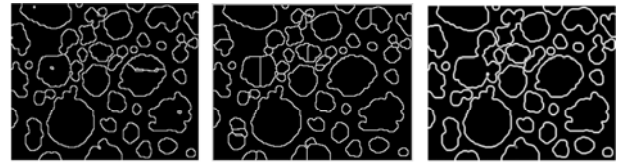


图 8 分水岭分割结果



(a) 无形态滤波的分割结果 (b) 无距离重构的分割结果 (c) Sobel 边缘检测结果

图 9 其他方法的分割结果

9(a)是对泡沫图像没有进行面积形态滤波直接后续分割的结果, 分割结果受到气泡亮点和噪声的影响出现了过分割现象, 图 9(b)是对距离变化图未采用 4.2 节所提出的距离重构而直接采用分水岭算法进行分割的结果, 出现严重的过分割现象, 图 9(c)是二值化的泡沫图像利用经典的 Sobel 边缘检测的方法分割的效果, 由图可以看出其算法无法将黏连气泡分割, 出现了欠分割的情况而且得到的分割线像素不单一。通过以上对比分析, 本文提出的泡沫图像分割方法解决了分水岭变换的过分割情况且能够准确地将黏连一起的气泡分割开来, 为得到准确的浮选泡沫的物理特征参数提供了保证。

图 10 是对图 8 的分割结果进行区域标注, 其分割结果与肉眼分割基本一致, 而且边界的连续性得到了保证。统计标识图中的标识点数来获得浮选气泡的数量, 其大小与形状由气泡边缘像素在距离变换反转图中的灰度值转换成距离来求得。

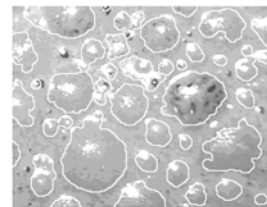


图 10 分割区域标注图

6 结束语

实验表明, 本文提出的分割方法克服了以往泡沫分割算法对图像要求具有某种特性的缺点, 具有鲁棒性好、边界定位准确等优点。利用 k -均值算法解决了轻金属浮选泡沫的前景气泡图像难于从背景图像提取的问题, 基于形态重构的思想提出结合高低精度距离变换对距离图像进行重构, 同时采用面积重构 h 顶改进变换为分水岭变换提取特征标识, 有效地解决了分水岭变换的过分割和欠分割情况。由分割后的泡沫图像可统计分析出气泡个数与尺寸等重要的物理特征参数从而为某矿石的浮选控制提供操作依据。此外该泡沫分割法对于其他矿物浮选泡沫的分析、颗粒分析、细胞分析等也具有借鉴意义。

由于 k -均值算法不能自动分类, 分类的方法需要凭经验

划分,且 k -均值迭代方法可能不收敛,有时需要重新启动迭代运算才能得到收敛的结果;下一步工作将结合其他算法如免疫算法、模糊算法对 k -均值聚类算法进行改进来消除聚类失败的情况,并将该泡沫分割方法投入实际应用。

参考文献

- [1] Moolman D W, Aldrich C, and Schmitz G P J. The interrelationship between surface froth characteristics and industrial flotation performance. *Minerals Engineering*, 1996, 9(8): 837-854.
- [2] Kaartinen J and Hatonen J. Machine-vision-based control of zinc flotation—A case study. *Control Engineering Practice*, 2006, 14(12): 1455-1466.
- [3] Moolman D W, Aldrich C, and Van Deventer J S J. The interpretation of flotation froth surfaces by using digital image analysis and neural networks. *Chemical Engineering Science*, 1995, 50(22): 3501-3513.
- [4] Sadr-Kazemi N and Cilliers J J. An image processing algorithm for measurement of flotation froth bubble size and shape distribution. *Minerals Engineering*, 1997, 10(10): 1075-1083.
- [5] Wang W X, Bergholm F, and Yang B. Froth delineation based on image classification. *Mineral Engineering*, 2003, 16(11): 1183-1192.
- [6] 冯征. 一种基于粗糙集的 k -means 聚类算法. 计算机工程与应用, 2006, 42(20): 141-146.
- [7] Feng Zheng. A rough-based K-means clustering algorithm. *computer. Engineering and Applications*, 2006, 42(20): 141-146.
- [8] Salembier P and Flat J S. Zones filtering connected operators and filters by reconstruction. *IEEE Trans. on Image Processing*, 1995, 4(8): 1153-1160.
- [9] Vincent L. Morphological grayscale reconstruction in image analysis: Applications and efficient algorithms. *IEEE Trans. on Image Processing*, 1993, 2(2): 176-201.
- [10] 岳振军, 邱望成, 刘春林. 一种自适应的多目标图像分割方法. 中国图象图形学报, 2004, 9(6): 674-678.
- [11] Yue Zhen-jun, Qiu Wang-cheng, and Liu Chun-lin. A self-adaptive approach of multi-object image segmentation. *Journal of Image and Graphics*, 2004, 9(6): 674-678.
- [12] Vincent L and Soille P. Watersheds in digital spaces: An efficient algorithm based on immersion simulations. *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1991, 13(6): 583-598.

阳春华: 女, 1965年生, 教授, 博士生导师, 从事图像处理与模式识别、复杂工业过程控制、智能化自动化控制系统与装置等研究。

杨尽英: 女, 1983年生, 硕士生, 研究方向为图像处理与模式识别、智能信息处理与融合。