

# 基于模糊三值模式的矿物浮选泡沫图像边缘检测方法

周开军<sup>1,2</sup>, 桂卫华<sup>1</sup>, 阳春华<sup>1</sup>, 谢永芳<sup>1</sup>

(1.中南大学信息科学与工程学院,湖南长沙 410083;2.湖南商学院计算机与信息工程学院,湖南长沙 410205)

**摘 要:** 针对一类边缘特征不明显的矿物浮选泡沫图像,提出了一种基于模糊三值模式的泡沫图像边缘检测方法.在‘0/1’二值模式基础上,增加不确定逻辑状态,构成模糊局部三值模式,以描述邻域像素灰度均值的不确定关系,同时,对邻域双向灰度差值之和进行模糊化,以描述边缘与非边缘方向的关系,联立邻域灰度关系与双向灰度差值隶属度,构造气泡边缘隶属度矩阵,依据联合隶属度的解模糊结果判决是否为边界候选像素,再根据边界候选像素集合的特征剔除非边界像素,以此得到泡沫边缘.实验结果表明,该方法能够有效地检测出气泡边缘,同时,在强噪声环境下,具有良好的鲁棒性.

**关键词:** 矿物浮选; 泡沫图像; 边缘检测; 模糊逻辑; 局部三值模式

**中图分类号:** TP391.4

**文献标识码:** A

**文章编号:** 0372-2112 (2014)04-0658-08

**电子学报 URL:** <http://www.ejournal.org.cn>

**DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2014.04.006

## Mineral Flotation Froth Image Edge Detection Method Based on Fuzzy Ternary Pattern

ZHOU Kai-jun<sup>1,2</sup>, GUI Wei-hua<sup>1</sup>, YANG Chun-hua<sup>1</sup>, XIE Yong-fang<sup>1</sup>

(1. School of Information Science and Engineering, Central South University, Changsha, Hunan 410083, China;

2. School of Computer and Information Engineering, Hunan University of Commerce, Changsha, Hunan 410205, China)

**Abstract:** Considering a class of mineral flotation froth image with uncertain edge characteristics, a bubble image edge detection method based on fuzzy ternary pattern is proposed. On the basis of ‘0/1’ binary logic, a kind of uncertain logic state is added. According to the bubble formation mechanism and its valley edge characteristics, the fuzzy local ternary pattern algorithm is introduced, which is used to describe uncertain relationship between center and neighborhood pixel average gray level. Meanwhile, the bidirectional grayscale difference is fuzzed to describe the relationship between edge and non-edge direction. On that basis, the neighborhood grayscale and bidirectional grayscale difference membership are combined, and the bubble edge membership degree matrix is constructed. Thus, the boundary candidate pixels are determined based on the defuzzification of joint membership. According to border candidate pixels characterized, the non-boundary pixels are removed, which yield the bubble edges. The experimental results show that the proposed method can effectively detect the bubble edges; meanwhile, the algorithm has a good robustness in high level noise environment.

**Key words:** mineral flotation; froth image; edge detection; fuzzy logic; local ternary pattern

## 1 引言

矿物浮选过程中,气泡形态直接反映了生产工况及生产指标,泡沫图像分割是形态特征提取的关键步骤<sup>[1,2]</sup>,而浮选气泡粘连且受生产环境及光照影响显著,使得边缘特征不明显,气泡边缘难以检测.

对于泡沫图像分割问题,目前主要有基于边缘和基

于区域的分割方法.文献[3]针对气泡呈现谷底型边缘的特点,采用流域方法比较边缘与周边像素灰度值的大小,以此分割泡沫图像;文献[4]提出了谷边缘分割算法,依据邻域像素灰度值极小值条件检测气泡边缘;针对浮选气泡粘连且顶部存在高光区域特点,研究人员们以高光区域作为标识图像,运用分水岭算法分割泡沫图像<sup>[5~7]</sup>,该方法对均匀分布的泡沫图像具有较好效果;

收稿日期:2013-06-06;修回日期:2013-09-25;责任编辑:孙瑶

基金项目:国家创新研究群体科学基金(No. 61321003);国家自然科学基金重点项目(No. 61134006);国家杰出青年科学基金(No. 61025015);国家自然科学基金(No. 61304253, No. 41101425, No. 61202464);湖南省自然科学基金(No. 13JJ4093, No. 13JJ4018, No. 12JJ3064);湖南省教育厅优秀青年项目(No. 11B070);湖南省重点学科建设项目

文献[8]提出了基于种子区域与边界增长的泡沫图像分割方法,以气泡顶部高光区域边界向四周增长实现泡沫图像分割.这些方法在较小光照干扰条件下取得了较好分割效果.但浮选生产过程中,泡沫图像常受到光照、雾气或信号干扰,气泡分布不均,使得标识图像难以准确提取,尤其在光照不均泡沫表面,泡沫图像分割算法对噪声敏感.

模糊逻辑类似于人类大脑的决策过程,能够在近似数据集中找到准确解,广泛应用于图像边缘检测<sup>[9-11]</sup>.模糊局部二值模式根据相邻像素灰度大小,采用由线性隶属度函数确定模糊像素集合单元,是一种有效的图像同质区域描述方法<sup>[12,13]</sup>.而三值逻辑在‘0/1’二值逻辑基础上,增加了不确定逻辑,它能够很好地描述图像中不确定的过渡区域<sup>[14]</sup>.本文针对泡沫图像包含不确定性边缘及光照斑点噪声特点,引入模糊逻辑的思想处理泡沫图像边缘不精确问题,同时,将气泡边缘的邻域灰度定义为局部三值模式,以此描述气泡边缘过渡区域的灰度值关系,再联立邻域灰度关系隶属度与双向灰度差值隶属度,求得气泡边缘隶属度,依据解模糊结果判决是否为边界候选像素,再根据边界候选像素集合的特征剔除非边界像素,以此得到泡沫边缘,解决一类浮选泡沫图像不确定性边缘检测问题.

## 2 矿物浮选泡沫形成机理分析

矿物浮选是对浮选槽内的矿浆加入药剂,同时鼓入空气搅拌,产生大量气泡,有用矿粒粘附在气泡上被带出,实现矿物品位提纯的目的.矿物浮选过程中,在重力以及气泡相互挤压作用下,大部分矿粒滑落至气泡边缘,使得气泡顶部矿粒较少,呈现为透明的水膜.泡沫图像在固定光照条件下获得,每个气泡顶部均存在高光反射区域(亮点),而在亮点以外的气泡区域存在矿粒堆积现象,导致反射光线较少,图像中的气泡边缘灰度级较低,而且每个气泡携带矿粒数量不同,气泡边缘区域较宽,可能具有不同的灰度值.此外,部分气泡顶部的矿浆滑落至气泡边缘,造成气泡边缘灰度值较高的现象,形成如图 1 所示的噪声突变边缘.

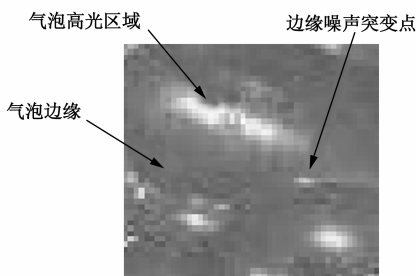


图1 气泡局部特征

与 6、8 与 9 之间为气泡顶部高光区域,虚线与气泡的交界处为高光区域边缘,实线 1、4、7 及 10 为灰度值较低的气泡边缘.实线 4 所处的边缘为突变噪声区,用形态学滤波进行处理,若将整个突变噪声区域滤除后,气泡边缘的过渡区域宽度加大,且灰度值发生改变,使得基于邻域灰度值极小的边缘检测算法出现偏差;若不能滤除突变噪声区,则算法会将该噪声区域当作气泡进行处理.为此,本文定义邻域灰度及双向灰度差值的模糊三值模式,通过寻找气泡边缘区域,并跟踪气泡边缘走向,实现气泡边缘检测.

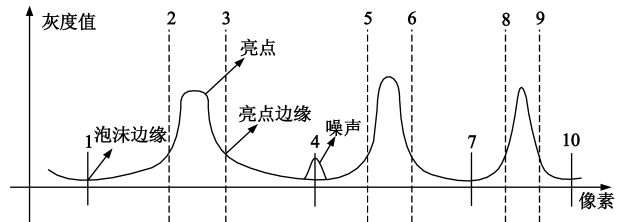


图2 气泡间的截面灰度值示意图

## 3 泡沫图像模糊三值模式边缘检测算子

针对泡沫图像边缘灰度值变化不明显的特点,本文采用非线性函数逼近泡沫图像灰度差值分布曲线,以此更客观地描述灰度值的变化趋势,同时,在局部二值模式基础上,增加邻域灰度一致模式,将气泡边缘的邻域灰度定义为局部三值模式,以描述气泡边缘过渡区域的灰度值关系.如图 3(a)所示为  $3 \times 3$  掩模区域,每个子区域由  $k \times k$  个像素按照正方形矩阵排列构成,其中  $k \in \mathbb{Z}^+$ ,其平均灰度值依次记为  $F = \{\overline{F}_0, \overline{F}_1, \dots, \overline{F}_8\}$ ,其中  $\overline{F}_0$  为区域中心像素的平均灰度值,定义邻域像素差  $d^i, i = 1, \dots, 8$ .由于邻域像素差值  $d^i$  有 3 种可能的状态,因此,依次扫描像素单元,比较中心与邻域像素的平均灰度大小,即可获得邻域像素差值的状态矩阵,其结果如图 3(b)所示.

$\overline{F}_1$	$\overline{F}_2$	$\overline{F}_3$	$d^1$	$d^2$	$d^3$
$\overline{F}_8$	$\overline{F}_0$	$\overline{F}_4$	$d^8$	0	$d^4$
$\overline{F}_7$	$\overline{F}_6$	$\overline{F}_5$	$d^7$	$d^6$	$d^5$

(a) 邻域像素平均灰度

(b) 邻域像素差值

图3 邻域像素平均灰度及差值

$$d^i = \begin{cases} \text{less,} & \text{if } \overline{F}_0 < \overline{F}_i \\ \text{equal,} & \text{if } \overline{F}_0 = \overline{F}_i \\ \text{large,} & \text{if } \overline{F}_0 > \overline{F}_i \end{cases} \quad (1)$$

### 3.1 边缘检测算子的模糊规则

为将输入变量变换为模糊变量,根据人眼的视觉感知机理,定义 3 条模糊规则,以此描述中心区域与邻

图 2 给出了气泡间截面灰度示意图,虚线 2 与 3、5

域平均灰度值之间的不确定关系。

**规则 1** 当中心区域灰度值  $\bar{F}_0$  越小于邻域区域灰度值  $\bar{F}_i$  时,  $d^i$  属于 *less* 的概率越大,  $d^i$  属于 *equal*、*large* 的概率越小;

**规则 2** 当中心区域灰度值  $\bar{F}_0$  越大于邻域区域灰度值  $\bar{F}_i$  时,  $d^i$  属于 *large* 的概率越大,  $d^i$  属于 *less*、*equal* 的概率越小;

**规则 3** 当中心区域灰度值  $\bar{F}_0$  与邻域区域灰度值  $\bar{F}_i$  越接近时,  $d^i$  属于 *equal* 的概率越大,  $d^i$  属于 *less*、*large* 的概率越小。

### 3.2 邻域灰度隶属度函数的确定

根据以上规则,利用隶属度函数描述邻域与中心区域灰度值的关系.计算邻域与中心区域的灰度差值  $d^i$ ,定义隶属度函数  $\mu_{less}(d^i)$ 、 $\mu_{equal}(d^i)$ 、 $\mu_{large}(d^i)$ ,它们分别表示属于小于、等于及大于的概率,掩模区域中第  $i$  个子区域的模糊单元表示为  $FE_i = [\mu_{less}(d^i), \mu_{equal}(d^i), \mu_{large}(d^i)]$ , ( $1 \leq i \leq 8$ ),则掩模区域记为  $FU = [FE_1, \dots, FE_8]$ ,对于任意  $\mu(d^i) \in [0, 1]$ ,且  $\mu_{less}(d^i) + \mu_{equal}(d^i) + \mu_{large}(d^i) = 1$ 。

为确定隶属度函数  $\mu_{less}(d^i)$ 、 $\mu_{equal}(d^i)$  及  $\mu_{large}(d^i)$ ,在浮选生产过程中,利用工业摄像机采集大量泡沫图像,统计其相邻像素的灰度差值如图 4 所示,图中给出了图像 8 邻域像素灰度差值的频率统计曲线,灰度差值的论域为  $[-255, 255]$ ,相邻像素为  $n \times 45^\circ$  方向,  $n \in [1, 8]$ 。

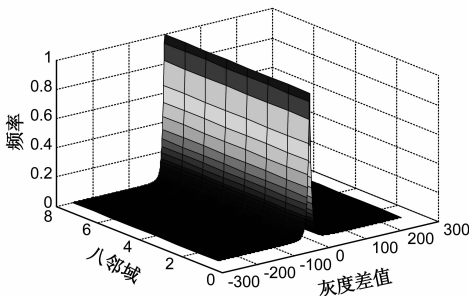


图4 相邻像素灰度差值分布

利用指数函数  $f(x) = e^{-0.18x}$  逼近泡沫图像邻域的灰度差值分布曲线,定义  $d^i$  的隶属度函数如下:

$$\mu_{less}(d^i) = \begin{cases} 0, & d^i \geq 0 \\ 1 - e^{-0.18d^i}, & -T < d^i < 0 \\ 1, & d^i \leq -T \end{cases} \quad (2)$$

$$\mu_{equal}(d^i) = \begin{cases} 0, & d^i \leq -T \\ e^{-0.18|d^i|}, & |d^i| < T \\ 0, & d^i \geq T \end{cases} \quad (3)$$

$$\mu_{large}(d^i) = \begin{cases} 0, & d^i < 0 \\ 1 - e^{-0.18d^i}, & 0 < d^i < T \\ 1, & d^i \geq T \end{cases} \quad (4)$$

在以上隶属度函数中,  $T$  为模糊度的控制参数,且  $T \in [0, 255]$ . 由于 8 邻域灰度差的绝对值大于 40 时的概率小于 0.001,为了便于计算,概率取为 0,因此,在隶属度函数定义中  $T = 40$ ,建立的模糊隶属函数如图 5 所示,由隶属度函数组成模糊单元:

$$FU = \{[\mu_{less}(d^1), \mu_{equal}(d^1), \mu_{large}(d^1)], \dots, [\mu_{less}(d^8), \mu_{equal}(d^8), \mu_{large}(d^8)]\} \quad (5)$$

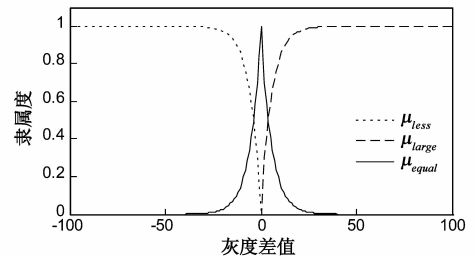


图5 邻域灰度差值的模糊隶属度函数

根据隶属度函数组成模糊单元,定义四个方向的灰度差值分别属于小、中、大的隶属度矩阵  $U^i$ ,以此构成气泡边缘的判决条件。

$$U^i = \begin{bmatrix} \mu_{less}(d^i) \wedge \mu_{less}(d^{i+4}) \\ \mu_{equal}(d^i) \wedge \mu_{equal}(d^{i+4}) \\ \mu_{large}(d^i) \wedge \mu_{large}(d^{i+4}) \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中,  $i \in [1, 4]$ , ‘ $\wedge$ ’表示交集运算。

利用模糊局部三值模式描述气泡边缘区域灰度关系,能够检测出气泡边缘的纵向过渡区域,但无法检测出边缘的横向区域,将可能导致检测的气泡边缘不连续<sup>[13]</sup>.为进一步跟踪气泡边缘的走向,定义图像边缘的双向灰度差值  $D^i = |\bar{F}_0 - \bar{F}_i| + |\bar{F}_0 - \bar{F}_{i+4}|$ ,  $i \in [1, 4]$ ,图 6(a)~(d)分别给出了  $s = 0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$  的几种图像边缘示意图,图 6(a)为水平方向边缘走向,其灰度差值的隶属度  $D = \{\text{小, 大, 大, 大}\}$ ;图 6(b)为  $45^\circ$  方向边缘走向,其灰度差值的隶属度  $D = \{\text{大, 小, 大, 大}\}$ ;图 6(c)为  $90^\circ$  方向边缘走向,其灰度差值的隶属度  $D = \{\text{大, 大, 小, 大}\}$ ;图 6(d)为  $135^\circ$  方向边缘走向,其灰度差值的隶属度  $D = \{\text{大, 大, 大, 小}\}$ .图 6(e)~(h)分别为包含光斑噪声的边缘走向.根据式(4)~(6),定义双向灰度差值  $D^i$  的模糊隶属度  $\tilde{U}^i$ :

$$\tilde{U}^i = [\mu_{less}(D^i) \quad \mu_{equal}(D^i) \quad \mu_{large}(D^i)] \quad (7)$$

### 3.3 边缘检测算子的解模糊化

通过邻域灰度模糊隶属度  $U^i$  及双向灰度差值模糊隶属度  $\tilde{U}^i$ ,构造如表 1 所示的边缘判决规则,当  $U^i$

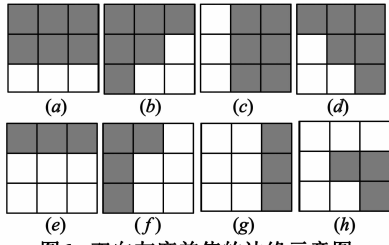


图6 双向灰度差值的边缘示意图

小,且 $\bar{U}^i$ 小时,像素区域属于泡沫边缘的可能性大;当 $U^i$ 小,且 $\bar{U}^i$ 适中时,像素区域属于泡沫边缘的可能性大;当 $U^i$ 小,且 $\bar{U}^i$ 大时,像素区域属于泡沫边缘的可能性适中;当 $U^i$ 适中,且 $\bar{U}^i$ 小时,像素区域属于泡沫边缘的可能性大;当 $U^i$ 适中,且 $\bar{U}^i$ 适中时,像素区域属于泡沫边缘的可能性适中;当 $U^i$ 适中,且 $\bar{U}^i$ 大时,像素区域属于泡沫边缘的可能性小;当 $U^i$ 大,且 $\bar{U}^i$ 小时,像素区域属于泡沫边缘的可能性适中;当 $U^i$ 大,且 $\bar{U}^i$ 适中时,像素区域属于泡沫边缘的可能性小;当 $U^i$ 大,且 $\bar{U}^i$ 大时,像素区域属于泡沫边缘的可能性小。

表 1 泡沫图像边缘检测的模糊判决表

	$\bar{U}_{less}^i$	$\bar{U}_{equal}^i$	$\bar{U}_{large}^i$
$U_{less}^i$	大	大	中
$U_{equal}^i$	大	中	小
$U_{large}^i$	中	小	小

实际计算时,根据邻域区域灰度差值隶属度矩阵,以及双向灰度差值隶属度矩阵的乘积,得到泡沫边缘联合概率矩阵 $P_c^i$ :

$$P_c^i = U^i \times \bar{U}^i \quad (8)$$

模糊系统输出表示像素属于边缘的程度,通过定义模糊规则,若 $P_c^i$ 的值越低,对应的像素集合属于边缘集合的可能性越低;若 $P_c^i$ 的值适中,对应的像素集合属于边缘集合的可能性适中;若 $P_c^i$ 的值高,对应的像素集合属于边缘集合的可能性越高。根据该规则,定义如图 7 所示的模糊输出隶属度函数。

根据联合概率矩阵 $P_c^i$ ,以及输出隶属度函数,对模糊边缘的隶属度进行解模糊,得到属于气泡边缘的 $P_{edge}^i$ :

$$P_{edge}^i = \sum_{j=1}^9 P_c^i(j) \times C_j \quad (9)$$

式中, $C_j \in \{C_L, C_M, C_H\}$ ,且 $C_L = 0.25, C_M = 0.5, C_H = 0.75$ 。

求取四个方向边缘隶属度的并集 $P_{edge} = \bigcup_{i \in \{1,4\}} P_{edge}^i$ ,

$\bigcup$ 表示并集运算,当 $P_{edge} \geq 0.5$ 时,检测的边缘即为气泡边缘,否则为气泡区域。利用本文方法得到的边界候选像素由边界和非边界像素两部分组成。为确保边界的连续性,对边界二值图像进行形态学的膨胀运算,以改善边界的连续性,为确保边界像素为单个像素,采用细化算法对图像进行细化处理;最后利用非边界滤波算子滤除孤立点及短线段,结合面积滤波滤除小的闭合曲线,最终得到准确的气泡边缘像素点。

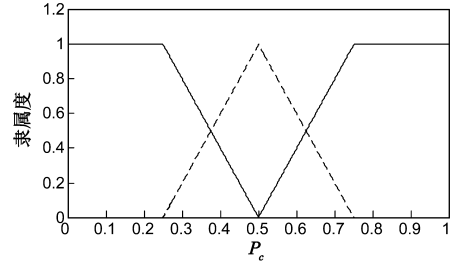


图7 模糊输出隶属度函数

对于图像分割或边缘检测结果评估,通常采用差异法<sup>[15]</sup>,为此,本文引入文献<sup>[16]</sup>的图像边缘检测评估方法,通过浮选专家经验,人工标注气泡边缘,以此作为真实的气泡边缘图像。定义 $N_g$ 为真实的气泡数量, $N_d$ 为检测的气泡数量, $N_t$ 为检测正确的气泡数量。气泡检测效率( DER)及准确率( ACR)分别定义为:

$$DER = \frac{N_t}{N_d} \times 100\% \quad (10)$$

$$ACR = \frac{N_t}{N_g} \times 100\% \quad (11)$$

## 4 实验与分析

### 4.1 浮选泡沫图像边缘检测过程

为了验证本文所提出的模糊三值模式的边缘检测算法性能,仿真实验以大量工业现场获取的浮选泡沫图像(1024×768, JPEG 格式)作为测试图像,计算机配置为英特尔 Core i5 - 2450M@2.50GHz 处理器,2GB DDR3@1333MHz 内存。实验过程中,掩模区域的子区域尺寸 $k = 3$ 。图 8(a)为铝土矿泡沫图像,图 8(e)为铜矿泡沫图像,图 8(b)(f)分别为根据专家经验,人工标注的泡沫边缘,将该图像看作真实的气泡边缘图像。根据模糊逻辑判断准则求取其边界候选像素的二值图像,再对边界图像进行膨胀运算,得到边界连续的非单像素宽,采用 8 邻域内细化判断算法,对图像进行细化处理。以面积滤波算法去除小的封闭的曲线,运用非边界滤波算子扫描图像,扫描的次数根据线段的形状及复杂度确定,将图像中的孤立点、线段及分叉线滤除,图 8(c)(g)分别为处理后的泡沫边缘,将分割结果在原图像上进行标注,结果如图 8(d)(h)所示,从图中可以看出,气泡边缘检测结

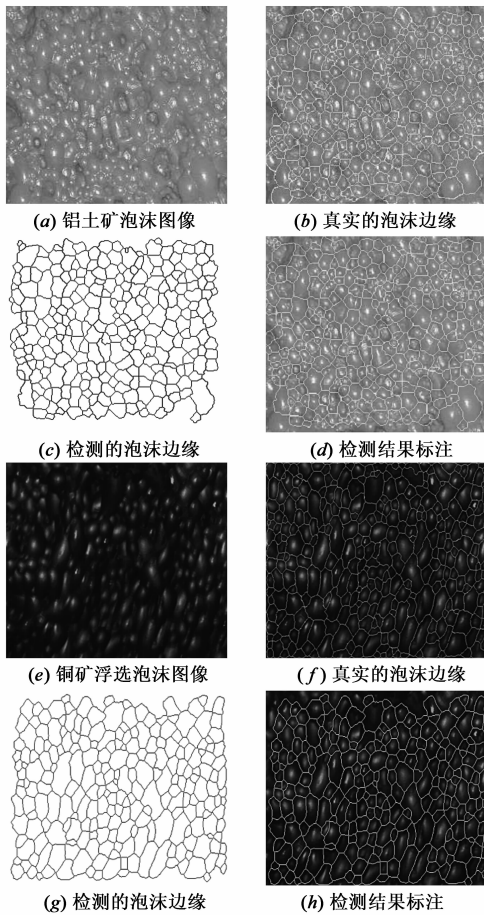


图8 泡沫图像边缘检测过程

果准确。需要说明的是,图像中的边界像素未被处理,是由于掩模区域的中心子区域不可能位于图像的边界像素点上,使得边缘检测算子不能访问图像边界部分像素,事实上,部分气泡在图像边界,无法构成完整的气泡边缘,不能反映真实气泡形态。

#### 4.2 掩模区域尺寸参数选择

为分析掩模区域的子区域尺寸  $k$  对泡沫图像边缘检测结果的影响,实验过程中,依次取  $k = 5, 7, 9, 11$ , 检测结果如图 9(a)~(d) 所示,从图中可以看出,随着  $k$  值的增大,尺寸小的气泡边缘未被检测出来,表现为欠分割的结果。为定量分析该尺寸对边缘检测过程影响,图 9(e) 给出了  $k = 1, \dots, 15$  时,气泡边缘检测的区域数量,当  $k = 1$  时,边缘检测表现为过分割,检测的区域数量为 315,随着  $k$  值增大,区域数量减少,当  $k = 15$  时,区域数量为 141。当  $k = 2, 3, 4$  时,区域数量变化不明显,说明边缘检测结果大致相当,而且从气泡边缘检测的实际结果来看, $k = 3$  为合适的取值。

以图 9(a) 所示的泡沫图像,运用本文边缘检测方法,选择不同模板尺寸,依次统计边缘检测误差,当边缘检测的准确率最高时,确定最优模板尺寸,再以该参

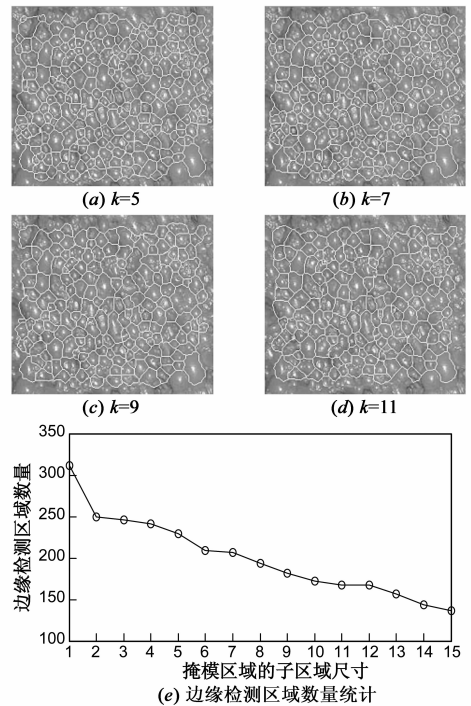


图9 基于模糊三值模式的泡沫图像边缘检测过程

数进行后续泡沫图像的边缘检测。随着掩模区域尺寸的增加,泡沫图像边缘检测效率统计结果如图 10(a) 所示。当掩模区域尺寸为 3~5 时, DER 较高,分别为 95.23%、94.45% 及 95.15%,说明在该区间段内,检测效率较高,这主要是由于掩模区域尺寸合适时,检测出

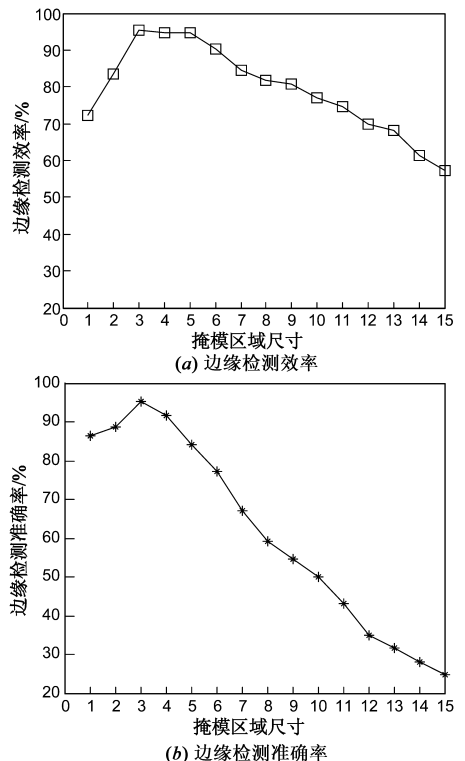


图10 泡沫图像边缘检测效率及准确率

的边缘主要为真实的气泡边缘,漏检或错检的气泡较少,使得气泡边缘检测效率较高.而当掩模区域尺寸较小或较大时, $DER$  迅速下降,说明检测出的气泡当中存在大量非真实气泡,导致检测效率较低.

图 10(b)为泡沫图像边缘检测的准确率曲线,图中给出了掩模区域尺寸变化区间为 $[0,15]$ ,当掩模区域尺寸为 1、2 时, $ACR$  分别为 87.32% 与 89.41%,当掩模区域尺寸为 3 时, $ACR$  为 95.16%,随着该尺寸的继续增大, $ACR$  下降速度较快,当该尺寸为 15 时, $ACR$  为 25.62%.

### 4.3 不同分割与边缘检测方法比较

为比较不同泡沫图像分割与边缘检测方法的性能,图 11 给出了 5 幅泡沫图像,分别运用文献[5~7]基于区域的泡沫图像分割算法、文献[3,4]基于边缘的泡沫检测算法,以及本文方法检测泡沫图像边缘,实验过程中,掩模区域的子区域尺寸  $k=3$ .图 11(a)(e)(i)分别给出了不含噪声的泡沫图像,其中,图 11(a)(e)为铝土矿泡沫图像,既包含大气泡,又夹杂较多的小气泡,图 11(i)为铜矿泡沫图像.图 11(b)(f)(j)为文献[5~

7]算法的分割结果,从图中可以看出,图像均存在严重的欠分割问题,特别是小气泡区域,存在较多欠分割区域,这主要是由于小气泡区域的标识图像难以提取,将小气泡集聚区域当作一个气泡进行处理.图 11(c)(g)(k)为文献[3,4]算法的检测结果,从图中可以看出,该算法比文献[5~7]算法的结果要好,但部分小气泡仍存在过分割,有些大气泡存在欠分割问题,图 11(d)(h)(l)为本文方法的边缘检测结果,从图中可以看出,与前两种算相比,气泡边缘检测结果更准确,减少了过分割区域,除了小气泡区域外,部分气泡破裂留下的凹陷区域也能够准确检测出来,此外,部分气泡间存在矿浆反射区域,仍能够较好地划分为气泡边缘.图 11(m)为含有高斯噪声的泡沫图像,在浮选生产车间粉尘及光照干扰条件下,由工业摄像机过曝光采集的泡沫图像,图 11(n)为文献[5~7]算法的分割结果,该结果明显存在欠分割问题,这是由于在含强噪声干扰下的泡沫图像中,提取标识图像所需的信息很难获取,导致分割结果不准确.图 11(o)为文献[3,4]算法的检测结果,尽管能够检测出大部分气泡区域,但仍存在过分割问题.图

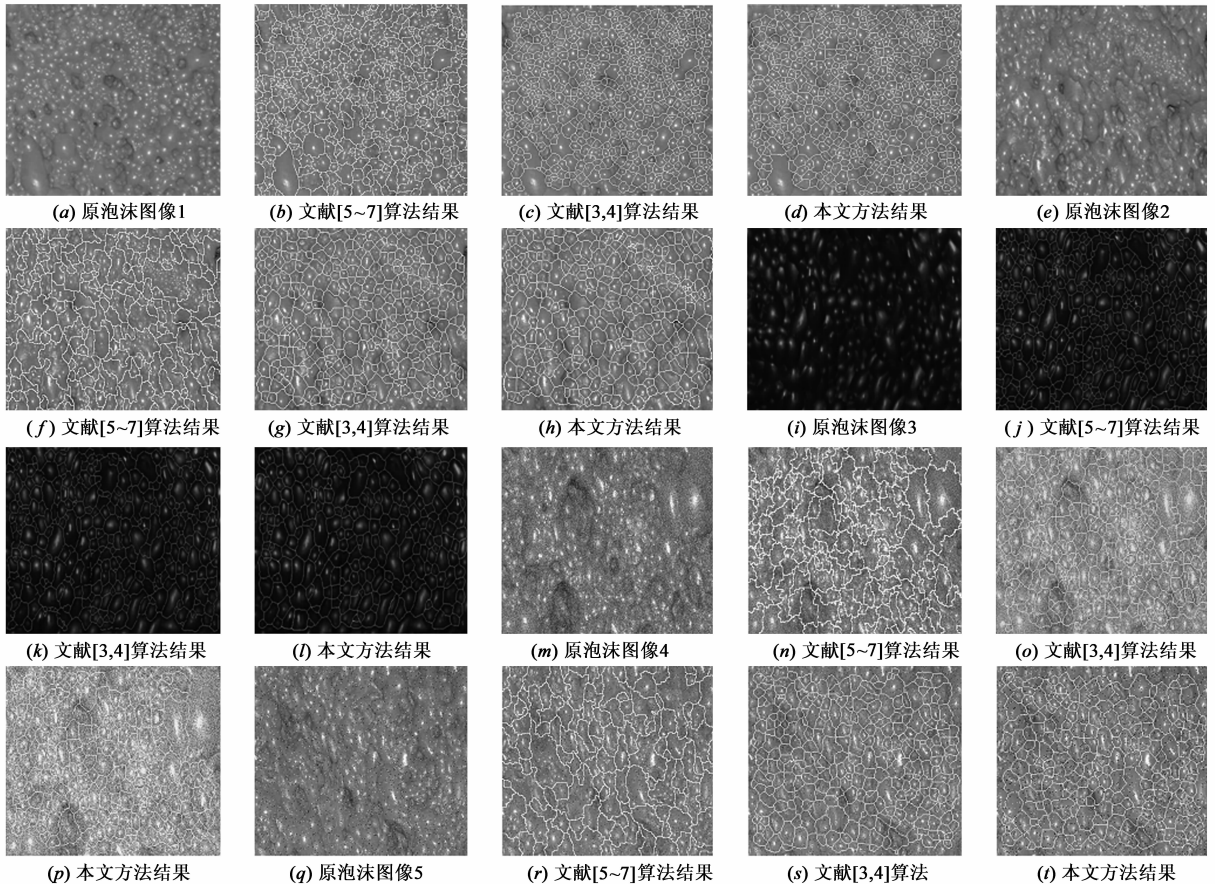


图 11 泡沫分割与边缘检测算法定性比较

11(p)为本文方法的检测结果,基本上与原图像的真实边缘一致.图 11(q)为包含椒盐噪声的泡沫图像,由浮选现场大型生产设备对图像信号产生的电磁干扰噪声,图 11(r)(s)分别为采用文献[5~7]、文献[3,4]算法的分割结果,其中,图 11(r)表现出严重的欠分割,图 11(s)表现部分气泡存在过分割问题,图 11(t)为本文方法结果,从图中可以看出,检测的气泡边缘结果准确,检测结果受噪声信号影响的程度明显减小,这主要是由于文献[3~7]算法均属于硬划分,对气泡本身的形态分布以及噪声比较敏感,而本文方法属于软划分,能够克服气泡边缘灰度不均及噪声的影响.

为定量比较各算法的处理结果,运用式(10)(11)的评估方法,对每一幅图像计算边缘检测效率及准确率,再对 5 幅图像结果求平均值.文献[5~7]的 *DER* 为 87.40%、*ACR* 为 85.81%;文献[3,4]的 *DER* 为 88.64%、*ACR* 为 89.35%;本文方法的 *DER* 为 90.51%、*ACR* 为 94.36%,由此可以看出,本文方法在边缘检测效率及准确率均高于前两种算法.为进一步比较各算法在不同噪声下的性能,对图 11(m)加以均值为 0、方差为 0.01-0.05 的高斯噪声,以此模拟浮选车间光照干扰.表 2 给出了不同噪声下的算法性能,从表中可以看出,虽然文献[5~7]的检测效率高,但准确性不高,文献[3,4]的准确性适中,但效率低,本文方法的抗干扰性更强.

表 2 泡沫分割与边缘检测算法定量比较

噪声强度	文献[5~7]算法		文献[3,4]算法		本文方法	
	<i>DER</i> (%)	<i>ACR</i> (%)	<i>DER</i> (%)	<i>ACR</i> (%)	<i>DER</i> (%)	<i>ACR</i> (%)
0.01	91.53	87.11	85.43	89.57	93.16	94.31
0.02	87.67	85.35	83.91	86.73	90.58	93.60
0.03	86.43	82.87	80.45	85.32	87.89	91.93
0.04	83.87	80.76	78.21	81.30	86.52	89.27
0.05	80.21	79.64	75.38	78.16	82.54	87.67
平均值	85.94	83.15	80.68	84.22	88.14	91.34

为定量评估不同算法,针对铝土矿和铜矿浮选过程,当工况稳定时,通过工业摄像机获取大量工业图像,选取 30 幅有代表性的泡沫图像作为测试对象(15 幅铝土矿泡沫图像,15 幅铜矿泡沫图像),其中包括 10 幅为正常图像;10 幅含有因光照干扰导致过曝光的图像,且噪声均值为 0,方差为 0.01-0.1;10 幅含有电磁干扰的图像,且噪声为 1%-10%.分别运用文献[5~7]算法、文献[3,4]算法及本文算法进行泡沫图像分割或边缘检测,计算 30 幅图像的 *DER* 与 *ACR* 平均值,以此衡量各算法性能.如表 3 所示,文献[5~7]算法的

*DER* 平均值为 86.01%,*ACR* 平均值为 88.19%;文献[3,4]算法的 *DER* 平均值为 87.57%,*ACR* 平均值为 88.06%;本文算法的 *DER* 平均值为 89.95%,*ACR* 平均值为 93.10%.由此看出,在工况稳定条件下,文献[5~7]算法与文献[3,4]算法的分割和边缘检测结果大致相当,但这些结果均低于本文方法,由此可以看出,本文算法均表现出良好的边缘检测效率与准确性.

表 3 不同分割与边缘检测算法定量评估结果

图像分割 与边缘检 测算法	文献[5~7]算法		文献[3,4]算法		本文方法	
	<i>DER</i> (%)	<i>ACR</i> (%)	<i>DER</i> (%)	<i>ACR</i> (%)	<i>DER</i> (%)	<i>ACR</i> (%)
平均值	86.01	88.19	87.57	88.06	89.95	93.10

## 5 结论与展望

本文针对一类矿物浮选泡沫图像边缘不明显,图像分割或边缘检测算法对光照等噪声敏感的问题,引入模糊逻辑思想,通过定义局部三值模式,将掩模区域的中心与邻域的灰度差值进行模糊化,采用非线性函数逼近 8 邻域灰度差值分布曲线,建立了邻域灰度差值的模糊隶属度函数,有效地解决了气泡边缘的过渡区域不确定问题,避免了受突变噪声对边缘检测算法产生的干扰问题.此外,通过定义双向灰度差值的模糊隶属度函数,解决了气泡边缘走向的跟踪问题,根据模糊边缘的方向,结合邻域灰度差值隶属度,建立了气泡边缘的联合隶属度矩阵,并对模糊边缘隶属度进行解模糊,给出了气泡边缘的判决结果,这种结合邻域灰度差值隶属度与双向灰度差值隶属度的机制,有效地提高了算法的鲁棒性,实验结果表明,提出的边缘检测算法在噪声泡沫图像的边缘检测中具有较好的鲁棒性,适合于各种类型的矿物浮选图像,具有较高的检测效率与准确性.

需要指出的是,本文方法中的掩模区域尺寸对边缘检测结果具有显著影响,而浮选工况波动时,气泡尺寸分布随之发生变化,因此,下一步将针对不同工况条件下的泡沫图像,研究掩模区域尺寸的自适应选择方法,进一步提高浮选泡沫图像边缘检测算法的普适性.

## 参考文献

- [1] Sameer H M, Martin C H, Dee J B. The use of machine vision to predict flotation performance [J]. *Minerals Engineering*, 2012, 10(36-38): 31-36.
- [2] Bergh L G, Yianatos J B. The long way toward multivariate predictive control of flotation processes [J]. *Journal of Process Control*, 2011, 21(2): 226-234.
- [3] Wang W, Bergholm F, Yang B. Froth delineation based on im-

- age classification [J]. Minerals Engineering, 2003, 16(3): 1183 - 1192.
- [4] Yang C H, Xu C H, Mu X M, et al. Bubble size estimation using interfacial morphological information for mineral flotation process monitoring [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2009, 19(3): 694 - 699.
- [5] Sameer H M, Dee J B, Martin C H. The use of the froth surface lamellae burst rate as a flotation froth stability measurement [J]. Minerals Engineering, 2012, 36(10): 152 - 159.
- [6] Xu C H, Gui W H, Yang C H, et al. Flotation process fault detection using output PDF of bubble size distribution [J]. Minerals Engineering, 2012, 26(1): 5 - 12.
- [7] Chen X F, Gui W H, Yang C H, et al. Adaptive image processing for bubbles in flotation process [J]. Measurement & Control, 2011, 44(4): 121 - 125.
- [8] Zhang G Y, Zhu H, Xu N. Flotation bubble image segmentation based on seed region boundary growing [J]. Mining Science and Technology (China), 2011, (21): 239 - 242.
- [9] 李娜, 刘芳. 基于模糊聚类视区划分的 SAR 目标识别方法 [J]. 电子学报, 2012, 40(2): 394 - 399.  
LI Na, LIU Fang. A SAR target recognition method based on view-aspects partitioned by fuzzy clustering [J]. Acta Electronica Sinica, 2012, 40(2): 394 - 399. (in Chinese)
- [10] Gao F, Chen B N, Sun J P. An adaptive fuzzy Markov random field model for change detection [J]. Chinese Journal of Electronics, 2012, 21(3): 466 - 470.
- [11] Keramidis E G, Iakovidis D K, Maroulis D. Fuzzy binary patterns for uncertainty aware texture representation [J]. Electronic Letters on Computer Vision and Image Analysis, 2011, 10(1): 63 - 78.
- [12] Loris N, Alessandra L, Sheryl B. Survey on LBP based texture descriptors for image classification [J]. Expert Systems with Applications, 2012, 39(9): 3634 - 3641.
- [13] Chaira T. A rank ordered filter for medical image edge enhancement and detection using intuitionistic fuzzy set [J]. Applied Soft Computing, 2012, 12(4): 1259 - 1266.
- [14] Isabelle B, Olivier C, Roberto M C J. On the ternary spatial relation "Between" [J]. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Part B: Cybernetics, 2006, 36(2): 312 - 327.
- [15] 钱晓华, 郭树旭, 李雪妍. 基于图像理解视角的分割全局评价算法 [J]. 电子学报, 2012, 40(10): 1989 - 1995.  
QIAN Xiao-hua, GUO Shu-xu, LI Xue-yan. Image understanding based global evaluation algorithm for segmentation [J]. Acta Electronica Sinica, 2012, 40(10): 1989 - 1995. (in Chinese)
- [16] Lopez-Molina C, DeBaets B, Bustince H. Quantitative error measures for edge detection [J]. Pattern Recognition, 2013, 46(4): 1125 - 113.

## 作者简介



**周开军** 男. 1979 年 9 月出生, 湖南常德人. 2009 年毕业于中南大学信息科学与工程学院, 其后在湖南商学院计算机与信息工程学院工作, 2010 年进入中南大学计算机科学与技术博士后流动站. 从事复杂工业过程图像信息处理方面的研究.

E-mail: kjzhou@csu.edu.cn



**桂卫华** 男. 1950 年 8 月出生, 湖北武汉人. 中国工程院院士、教授、博士生导师、中国自动化学会理事和计算机学术委员会主任委员. 现为有色冶金自动化教育部研究工程中心主任, 主要从事复杂工业过程建模与优化控制方面的研究工作.

E-mail: gwh@csu.edu.cn



**阳春华** 女. 1965 年 1 月出生, 湖南娄底人. 教授、博士生导师, 中南大学信息与工程学院副院长, 中国有色金属学会计算机学术委员会委员兼秘书长, 中国自动化学会理事, 主要从事复杂工业过程信息处理、建模与优化控制方面的研究工作.

E-mail: ychh@csu.edu.cn



**谢永芳(通信作者)** 男. 1972 年 8 月出生, 河南郸城人. 教授、博士生导师, 教育部新世纪优秀人才, 湖南省高校青年骨干教师, 主要从事复杂工业过程建模与优化控制方面的研究工作.

E-mail: yfxie@csu.edu.cn