

基于 Haar-PP 混合特征提取的沉降颗粒识别研究

周 冉, 宋华珠, 刘 翔

(武汉理工大学 计算机科学与技术学院, 武汉 430070)

摘 要: 针对沉降颗粒识别与轨迹追踪中由于灰度模糊、变化造成的识别通过率低、准确度差的问题, 对由沉降颗粒的个体形态、运动形态以及空间运动引起的动态灰度变化进行分析, 完成激光散射像点图像灰度增强、像素特征转换、像素点连通性判断等处理过程, 在此基础上提出一种基于 Haar-PP 混合特征的沉降颗粒识别算法。实验结果表明, 与高斯混合模型相比, 该算法有较高的识别率, 且时间复杂度较低。

关键词: 沉降颗粒; 激光散射; 特征提取; 灰度增强; Haar-PP 混合特征

中文引用格式: 周 冉, 宋华珠, 刘 翔. 基于 Haar-PP 混合特征提取的沉降颗粒识别研究 [J]. 计算机工程, 2018, 44(12): 251-257.

英文引用格式: ZHOU Ran, SONG Huazhu, LIU Xiang. Research on settlement particle recognition based on Haar-PP mixed feature extraction [J]. Computer Engineering, 2018, 44(12): 251-257.

Research on Settlement Particle Recognition Based on Haar-PP Mixed Feature Extraction

ZHOU Ran, SONG Huazhu, LIU Xiang

(School of Computer Science and Technology, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

[Abstract] To solve the problem that gray blurring and variation cause low recognition rate and poor accuracy for trajectory tracking and trajectory tracking, the processing of gray-scale enhancement, pixel feature conversion and pixel point connectivity of laser scattering image is completed by the analysis of the dynamic gradation changes caused by the individual shape, motion shape and spatial motion of the settled particles. A settlement particle recognition strategy based on Haar-PP mixed feature is proposed. Experimental results show that compared with the Gaussian mixed model, the algorithm has higher recognition rate and lower time complexity.

[Key words] settlement particle; laser light scattering; feature extraction; grayscale enhancement; Haar-PP mixed feature

DOI: 10.19678/j.issn.1000-3428.0049039

0 概述

颗粒粒度检测方法因能够测试颗粒粒径, 已成为材料在制作加工或使用过程中控制粒径大小的重要手段, 在材料粒度分析领域有极大的研究与应用价值^[1-2]。传统的粒度测试方法有筛分法和激光法, 前者灵活方便, 后者精度较高, 但同时前者精度难以达到要求, 后者依赖于精密仪器导致成本高昂^[3-4]。因此, 研究人员提出了基于图像分析颗粒粒度测试方法, 该类方法简单便捷、对仪器要求不高, 且能通过算法改良来提高结果可靠性、精度等。同时, 该类方法还拥有非入侵式的特点, 能够在不影响实验结果的前提下, 反映颗粒的沉降情况, 对液体内部的颗

粒进行识别、跟踪、粒度分析等。

近年来, 许多国内外专家致力于研究颗粒图像的识别与分割。文献[5]提出一种无参数回归方法来为 3D 图像信息降噪。文献[6]改良了传统非局部均值滤波 (Non-local Mean Filtering, NMF) 并结合粒子概率 (Particle Probability, PP) 还原被泊松-高斯噪声污染过的图像。上述方法的图像识别结果较好, 但颗粒与背景区分度不高, 并且灰度模糊。针对该问题, 本文通过分析颗粒消失、聚合以及分散运动对成像灰度的影响, 对识别图像进行灰度增强、像素特征转换、像素点连通性判断等处理, 并在此基础上提出一种基于 Haar-PP 混合特征的沉降颗粒识别策略。

基金项目: 国家科技基础性工作专项 (2014FY110900)。

作者简介: 周 冉 (1992—), 男, 硕士研究生, 主研方向为图像处理、数据挖掘; 宋华珠 (通信作者), 副教授、博士; 刘 翔, 硕士研究生。

收稿日期: 2017-10-23 **修回日期:** 2017-11-29 **E-mail:** shuaz@whut.edu.cn

1 识别策略及形态运动、灰度分析

1.1 沉降颗粒激光散射像点识别策略

沉降颗粒的识别、跟踪是一种颗粒运动的动态捕捉过程。由于在实际过程中无法有效观测到沉降颗粒的运动过程,因此本文采用激光散射的方法实现对颗粒重量、尺寸、分布及聚集态结构等信息的捕

捉^[7-8]。通过在颗粒运动过程中不断地捕捉瞬态图像,可得到一帧一帧的激光散射像点图。实现颗粒跟踪的重点在于完成运动状态下颗粒状态的有效识别。考虑到颗粒灰度存在的动态变化且有较多灰度值低(灰度模糊)的沉降颗粒,因此在识别上需要实现动态判定有效目标。本文制定的沉降颗粒激光散射像点识别策略如图1所示。

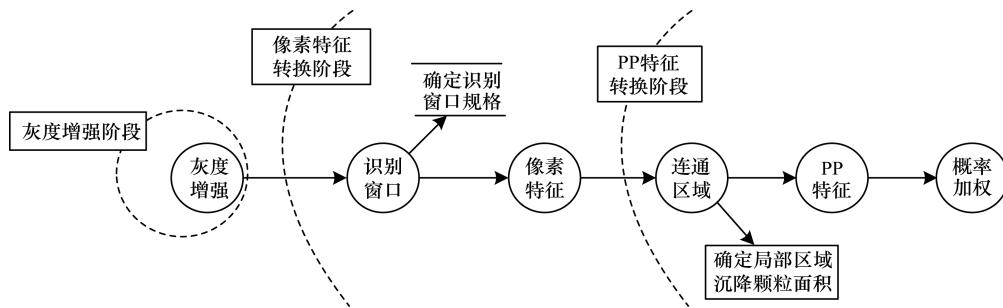


图1 沉降颗粒激光散射像点识别策略

针对灰度模糊及运动带来的灰度变化问题,首先需要完成对每一帧中像点的灰度增强,改变图像前景与背景的灰度对比度,降低噪声影响;其次为了更好地进行PP特征的判断,则必须对识别窗口进行规格大小的确定,并根据区域像素连通性计算颗粒面积;最后对特殊处理后所得的Haar特征像素点增加粒子概率属性,普遍认为粒子概率越高的像素点被识别通过的概率越高。为了进一步提高准确率,本文在粒子概率的基础上,通过概率加权的方法得到最终的识别结果。

1.2 沉降颗粒形态与运动分析

对于颗粒特征的提取与识别研究,首先需要完成对颗粒群中不同个体的形态、运动分析。粒子形态特征的选取需要根据粒子本身的状态来决定,如图2(a)所示,在颗粒沉降视频中,绝大多数沉降颗粒虽然大小相近,但其周长、面积、极轴、极轴夹角和质心位置等各种数据特征却不尽相同^[9-10]。除了上述所提及的一般化的形态特征,也有小部分的沉降颗粒与一般颗粒因本身物理性质或者拍摄原因会产生较大差别,主要体现在大颗粒与长尾颗粒上。在颗粒沉降视频中,一般沉降颗粒的形态特征与图2(a)相符,但是也有个别沉降颗粒的大小会大于图2(a)中颗粒。如图2(b)所示,沉降颗粒在沉降液体中发生结块现象,因此整个颗粒的大小会大于一般颗粒的大小。由于摄像机清晰度的问题,在拍摄的颗粒沉降视频中,颗粒可能会带有较长的尾迹。沉降颗粒中的长尾颗粒如图2(c)所示。

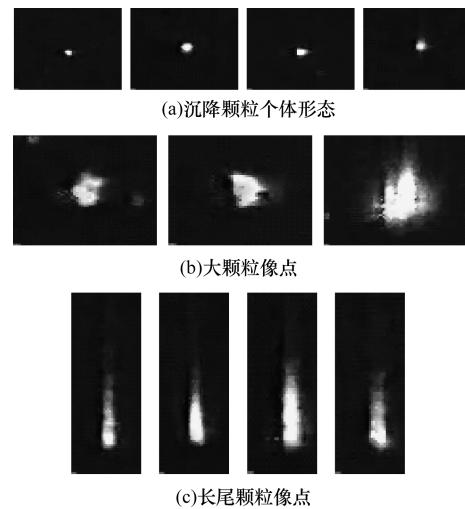


图2 沉降颗粒的不同形态

颗粒运动的轨迹是无规则的,但在平面运动上可分解为水平与垂直方向。在大量的激光散射采样中,通过对个体运动状态的分析得出一般情况下的颗粒运动过程,如图3(a)所示。图3(a)为沉降颗粒在150帧内发生的位移图,实线末端表示颗粒的始末位置,虚线表示垂直移动距离。2条实线的差距代表沉降颗粒在150帧之后,水平方向移动距离。可以看出一般情况下,沉降颗粒一直做沉降运动并伴随着水平方向上的微小位移。但如果受到外界扰动,则颗粒群会表现出明显的类圆运动。譬如沉降环境中加入了新的沉降物质,颗粒的沉降运动就会明显波动,如图3(b)所示。图3(b)左图的沉降颗粒的总体沉降轨迹类似于圆弧。这2种现象可能同时发生,都属于类圆运动的范畴。

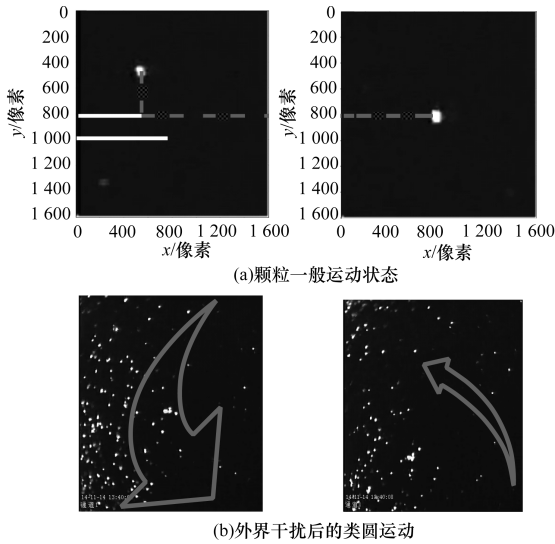


图 3 颗粒的不同运动状态

1.3 沉降颗粒动态灰度分析

沉降颗粒的实际运动过程为空间三维运动,而表现在图像识别中却只能为二维运动,但这并不影响图像处理对三维运动的判断。在成像过程中,颗粒的远近程度实质上表现在像点的灰度值上。因此,沉降颗粒的散射像点图中的灰度值是动态的,具体可以表现在 2 个方面:同一帧图像中不同颗粒呈现不同灰度值,不同帧图像中同一颗粒呈现不同灰度值。

对于单帧图像中的颗粒群而言,由于远近程度、大小、角度等因素,其灰度值是不同的。图 4(a)为图 3(b)中随机 2 个沉降颗粒及其像素分布图,可以看出左边的颗粒灰度值较小,右边较大,具体表现在对应的灰度直方图中的曲线也明显不同。本文同时进行了对同一颗粒不同帧的灰度分析,如图 4(b)所示。图 4(b)中为 2 种颗粒在不同 4 帧图像中的灰度表现,结果表明颗粒会随着运动而表现出不同的灰度值。

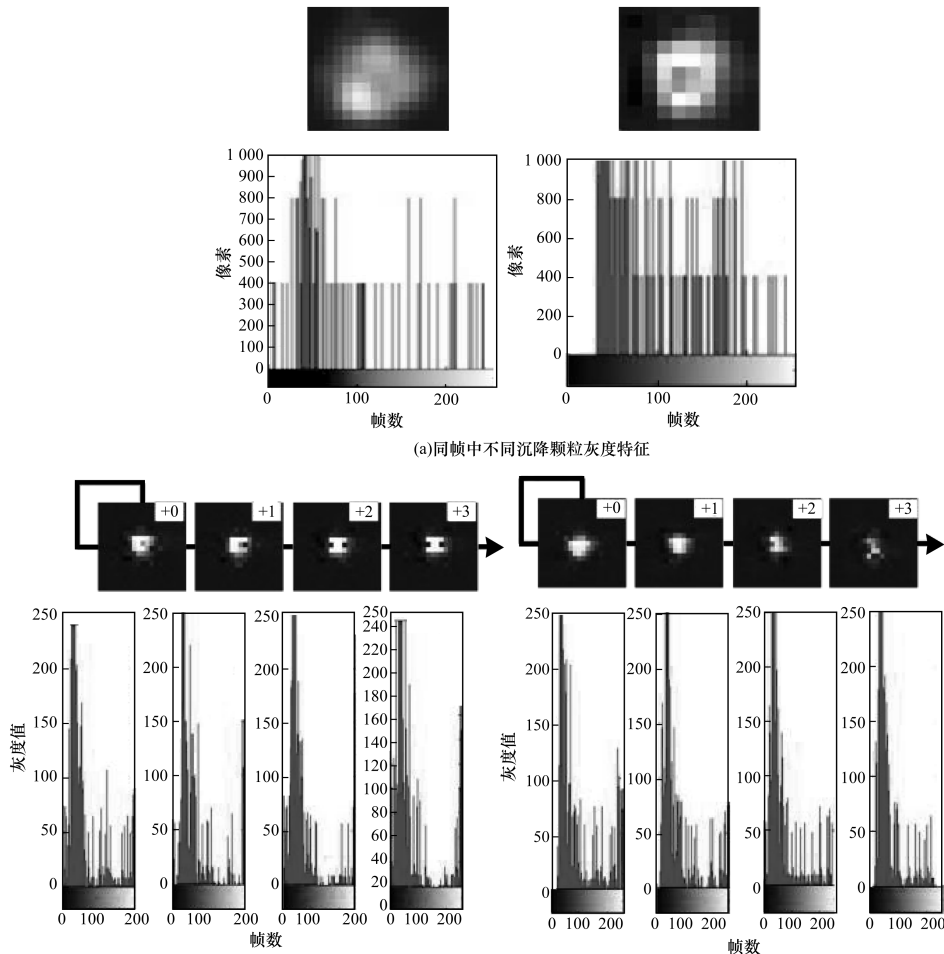


图 4 2 种形式的灰度特征

2 Haar-PP 混合特征策略实现

2.1 各阶段图像预处理

图像预处理步骤如下:

1) 灰度增强阶段

颗粒识别前的图像预处理策略,是为了使得

识别环境更加友好,降低图像噪音,增强颗粒信号,以达到改变前景与背景之间的对比度、凸显沉降颗粒等目的^[11]。混合重力沉降系统环境简单,噪音干扰较少,因此只在识别前进行灰度增强处理,使得:

$$f(d \in I_i^{\text{gray_enhanced}}) = \begin{cases} 255, Zf(d \in I_i^{\text{old}}) \geq 255 \\ Zf(d \in I_i^{\text{old}}), Zf(d \in I_i^{\text{old}}) < 255 \end{cases} \quad (1)$$

其中, $I_i^{\text{gray_enhanced}}$ 为灰度增强后的图像, I_i^{old} 为增强前的图像, Z 为灰度增强因子, 且 $Z = 1.5$ 。

2) 像素特征转换

在像素转换阶段, 核心内容是确定识别窗口的大小。为了防止单一识别窗口效果不佳, 本文以 7×7 为基础, 每次增强 1.5 倍并设立多个识别窗口。共选择 $7 \times 7, 11 \times 11, 17 \times 17, 25 \times 25$ 和 $37 \times 37, 5$ 个识别窗口来综合计算 Haar 特征信息, 图 5 为窗口确定示意图。考虑到沉降颗粒的背景因素, 在综合运用多规格识别窗口的 Haar 特征信息时, 将对 5 个窗口的 Haar 特征值进行加权处理。

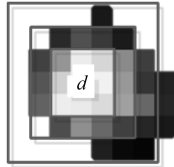


图 5 以像素点 d 为中心的 3 个识别窗口

3) PP 特征转换

在 PP 特征转换阶段, 根据像素概率理论, 以像素点 d 为中心的局部区域内, 将连通区域与局部区域面积之比作为概率值, 因此需要对连通区域面积进行合理的算法设计。该算法从像素点 d 开始, 向上下左右 4 个方向延伸, 判断邻近像素点 e 是否符合连通条件, 符合则以 e 为基础继续朝 4 个方向搜索, 直至没有其他像素点符合条件, 或达到图像边界。该算法时间复杂度为 $O(n)$, n 为连通区域内像素个数。图 6 为连通性示意图。

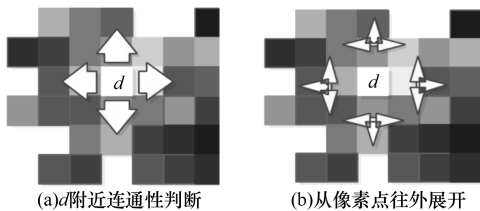


图 6 像素点连通性判断

算法 1 连通区域搜索算法

输入 输入沉降颗粒灰度图像 I , 输入像素点 d 坐标 (x, y)

输出 连通区域 Ω

ConnectivitySearch(I, d)

Step 1: $x_0 \leftarrow x + 1$ 得到新像素点 d_0

if $f_h(d_0) \geq \lambda_h$

then

d_0 计入连通区域 Ω

$\Omega \leftarrow \Omega + \text{ConnectivitySearch}(I, d_0)$

else return φ

Step 2: $x_1 \leftarrow x - 1$ 得到新像素点 d_1

同 Step 1

Step 3: $y_0 \leftarrow y - 1$ 得到新像素点 d_2

同 Step 1

Step 4: $y_2 \leftarrow y + 1$ 得到新像素点 d_4

同 Step 1

2.2 Haar-PP 混合特征算法

Haar 特征是一种基于矩形区域灰度强度差来进行识别的特征描述算子^[12-15]。本文建立 3 个 Haar 特征作为识别颗粒的条件之一, 如图 7 所示。以 d 为中心的识别窗口被划分成黑色和白色 2 个子区域, 白色区域被标记为 A 区域, 黑色区域被标记为 B 区域。

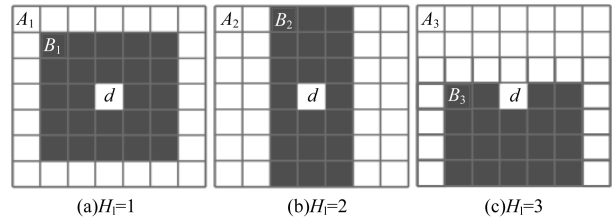


图 7 3 个不同的用于沉降颗粒识别的 Haar 特征

约定 Haar 特征函数为 $f_h(\cdot)$, $f_h(d, l)$ 为像素点 d 在特征 l 下的 Haar 特征值, 有

$$f_h(d, l) = B_l - A_l \quad (2)$$

其中, d 为像素中心, $l = 1, 2, 3$, 代表图 7 所示的 7×7 规格的沉降颗粒识别窗口 (Haar 特征识别窗口), A_l 代表白色区域的灰度值之和, B_l 代表黑色区域灰度值之和。

最终的 Haar 特征值为 3 个不同大小 Haar 特征值中最大的一个, 即:

$$f_h(d) = \max_l f_h(d, l) \quad (3)$$

当 Haar 特征值 $f_h(d)$ 高于所定阈值, 则代表该像素点位于沉降颗粒中。

当算法遍历完图像中所有像素点, 原图像就转化为 Haar 特征图像, 则有:

$$I_i^h = f_h(I_i^{\text{gray_enhanced}}) \quad (4)$$

其中, $I_i^{\text{gray_enhanced}}$ 为灰度增强图像, I_i^h 为转化后的 Haar 特征图像。

将原图像转换为 Haar 特征图像 I_i^h 之后, 基于式 (3) 为每个像素点 d 加入粒子概率的属性, 将其从 Haar 特征图像 I_i^h 转化为粒子概率^[16] (PP 特征) 图像 I_i^{pp} 。式 (5) 代表的结果为在以像素点 d 为中心的概

率识别窗口 W 中,像素点 d 是某沉降颗粒一部分的概率 $f_{pp}(d)$ 。为:

$$f_{pp}(d) = \frac{l\{r(d,e)\}}{l\{e \in w\}} = \frac{l\{f_h(e \in w) \geq th^h \cap \text{adjoin}(d, \Omega, e)\}}{l\{e \in w\}} \quad (5)$$

其中, th^h 为用于区分沉降颗粒的阈值。像素点 d 粒子概率的大小取决于识别窗口本身以及周围像素点 Haar 特征值的大小。如果周围超过 Haar 特征值阈值 λ_h 的像素越多,且与像素点 d 以区域 Ω 邻近,那么像素点 d 越可能是沉降颗粒的一部分。如图 8 所示,经过计算可得 $f_{pp}(d) > f_{pp}(e)$,从图 8 可以看出,像素点 d 的识别窗口内基本是沉降颗粒,而像素点 e 的识别窗口内只有很少量的颗粒是沉降颗粒,因此判断像素点 d 为沉降颗粒可能性更大。

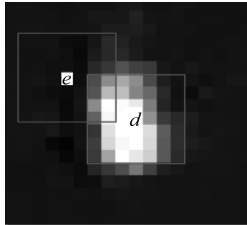


图 8 像素点 d 与 e 之间的粒子概率对比

在得到 PP 特征图像 I_t^{pp} 后,将其与单位图像 I^u (灰度值全为 255 的图像) 对应,得到灰度值进行过处理的概率加权图像 I_t^{pw} 。

$$I_t^{pw} = I_t^{pp} \otimes I^u \quad (6)$$

其中, \otimes 表示 I_t^{pp} 每一个粒子概率与 I^u 对应位置的灰度值相乘,并且将得到的图像依据 th_{pw} 二值化,方便颗粒跟踪,即

$$f(d \in I_t^{pw}) = \begin{cases} 0, & 255f(d \in I_t^{pp}) < th_{pw} \\ 255, & 255f(d \in I_t^{pp}) \geq th_{pw} \end{cases} \quad (7)$$

沉降颗粒识别算法如算法 2 所示,该算法的时间复杂度为 $O(\text{Height} \times \text{Width})$ 。其中, Height 为沉降颗粒图像高度, Width 为宽度。

算法 2 沉降颗粒识别

输入 沉降颗粒灰度增强图像 I , 二值化阈值 th_{pw}

输出 概率加权图像 I^{pw}

Do while $l \leftarrow 1; 3$

Do while $h \leftarrow 1; \text{Height}$

Do while $w \leftarrow 1; \text{Width}$

Step1: 得到对应像素点 d ,

Step2: 计算

$$f_h(d) \leftarrow \max_l f_h(d, l)$$

end

end

end

Do while $h \leftarrow 1; \text{Height}$

Do while $w \leftarrow 1; \text{Width}$

Step3: 得到对应像素点 d

Step4: 计算像素点 d 的连通区域

Step5: 计算 $f_{pp}(d)$

Step6: $I_t^{pw} \leftarrow I_t^{pp} \otimes I^u$

end

end

3 实验结果与分析

实验数据来源于“异相颗粒共沉降装置”中的颗粒沉降实验。颗粒沉降实验在混合重力沉降系统上完成,系统内的激光与沉降颗粒碰撞形成反射,通过系统外部的摄像机在侧面拍摄得到沉降颗粒激光散射像点视频。实验所得视频共 2 个,视频 1 长 27 min 37 s,视频 2 长 20 min 7 s,包含 25 frame/s,分辨率为 576 像素 \times 960 像素。对该视频的解析以及对颗粒沉降图像的分析借助于 OpenCV3 的视频解析模块与图像分析模块。在 OpenCV3 模块的基础上将本文算法形成代码,识别沉降颗粒,跟踪颗粒沉降过程,具体实验环境如表 1 所示。

表 1 实验环境

配置	规格
CPU	i5 2.6 GHz
内存	8GB DDR3
显卡内存	2GB
操作系统	Win 10
IDE	VS 2010
图像处理库	OpenCV 3.0

为了能识别到尽可能多的沉降颗粒,将 Haar 特征阈值 λ_h 确定为典型粒子区域与典型背景区域灰度平均值的 20%,经过计算, $th_h = 21$ 。

通过 Haar-pp 混合特征策略得到的最终识别结果如图 9 所示。图 9 第 2 行和第 3 行为原图像经过灰度增强、Haar 特征转换、PP 特征转换后对比度增强的结果。图 9 第 1 行和第 4 行分别为经过 Haar 特征图像和 PP 特征转换得到概率加权图像。从图 9 第 2 行第 3 个图像可以发现,图像从灰度增强图像中识别出更多灰度值低的沉降颗粒,但是同时带来的问题是噪音的增多。通过 PP 特征转换来降低噪音带来的干扰,处理结果如图 10 所示。

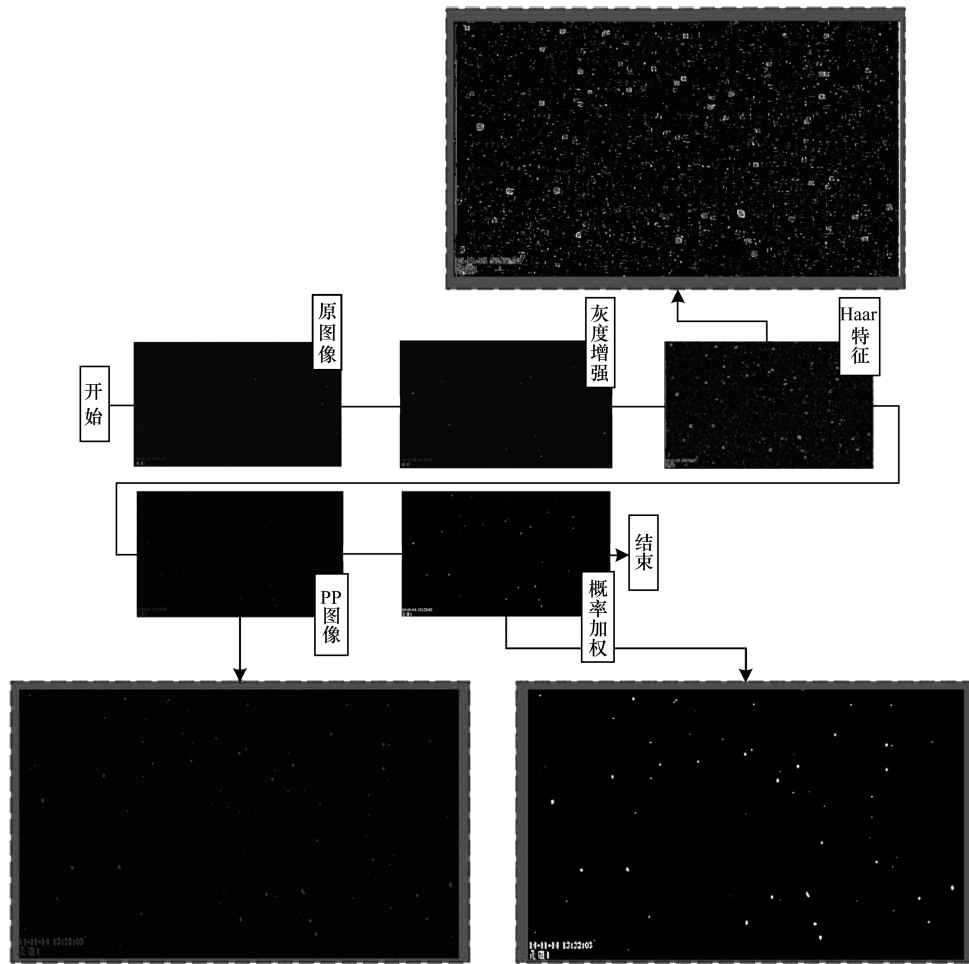


图 9 沉降颗粒识别结果

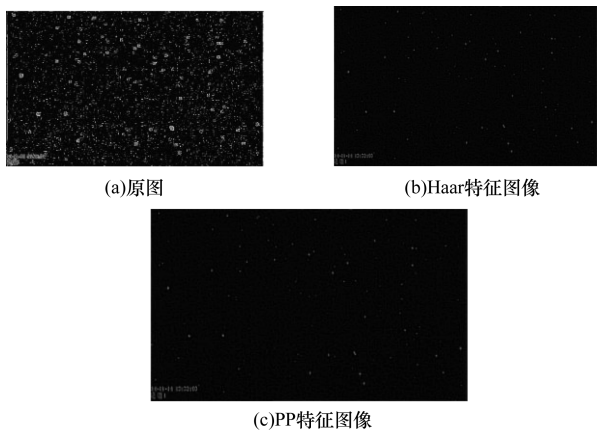


图 10 转换过程中的降噪结果

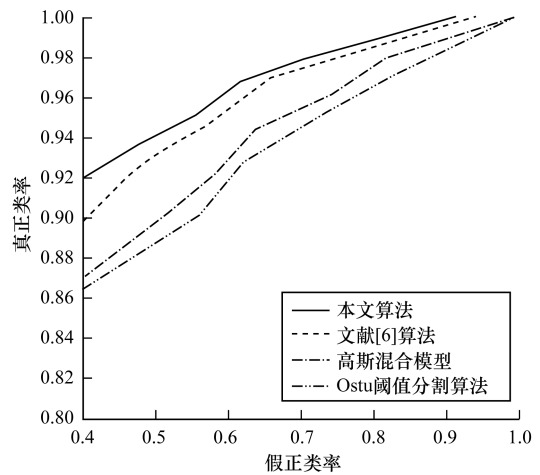


图 11 不同方法的 ROC 曲线

图 11 描述各方法真正类率 (True Positive Rate, TPR) 和假正类率 (False Positive Rate, FPR) 的接受者操作特性曲线 (Receiver Operating Characteristic Curve, ROC)。从图 11 可以看出,较高的 TPR 代表本文算法从图像中选出真的沉降颗粒的能力较高,且本文算法和文献[6]算法优于高斯混合模型与 Ostu 阈值分割算法。

本文算法在计算 Haar 特征方面做了简化,需要的计算量为 Harr 特征转换后识别的粒子的 0.2 倍,较文献[6]算法提升 22.3 s,且特征提取效果略优于文献[6]算法。表 2 描述了各种方法的平均计算时间。

表2 各算法平均计算时间对比

算法	时间/s
本文算法	6.4
文献[6]算法	28.7
高斯混合模型	<1.0
OTSU 阈值分割算法	<1.0

4 结束语

本文通过研究灰度变化与颗粒追踪的关系,分析沉降颗粒形态、运动对其灰度的影响,并运用识别图像进行灰度增强、像素特征转换、像素点连通性判断等消除灰度模糊的方法,提出一种基于 Haar-PP 混合特征的沉降颗粒识别算法。实验结果表明,该算法能有效降低灰度模糊带来的误差,为粒子追踪方面的研究提供理论依据。

参考文献

- [1] 马静静,蒋小平,彭铃舒. 遗传算法在反演颗粒粒径分布中的应用[J]. 计算机工程与设计, 2011, 32(3): 1051-1054.
- [2] 刘飞禹,王攀,王军,等. 颗粒粒径对格栅-土界面静、动力直剪特性的影响[J]. 岩土力学, 2017, 38(1): 150-156.
- [3] QIAN J, FANG B, LI C, et al. Coarse-to-fine particle segmentation in microscopic urinary images [C]// Proceedings of International Conference on Bioinformatics and Biomedical Engineering. Washington D. C., USA; IEEE Press, 2009: 1-4.
- [4] JAISWAL A, GODINEZ W J, EILS R, et al. Tracking virus particles in fluorescence microscopy images using two-step multi-frame association [C]// Proceedings of IEEE International Symposium on Biomedical Imaging. Washington D. C., USA; IEEE Press, 2012: 664-667.
- [5] BOULANGER J, KERVRANN C, BOUTHEMY P, et al. Patch-based nonlocal functional for denoising fluorescence microscopy image sequences [J]. IEEE Transactions on

- Medical Imaging, 2010, 29(2): 442-454.
- [6] YANG L, PARTON R, BALL G, et al. An adaptive non-local means filter for denoising live-cell images and improving particle detection [J]. Journal of Structural Biology, 2010, 172(3): 233-243.
- [7] SCHUSTER B S, ENSIGN L M, ALLAN D B, et al. Particle tracking in drug and gene delivery research; state-of-the-art applications and methods [J]. Advanced Drug Delivery Reviews, 2015, 91: 70-91.
- [8] KHAN M W, SALMAN N, ALI A, et al. A comparative study of target tracking with Kalman filter, extended Kalman filter and particle filter using received signal strength measurements [C]// Proceedings of International Conference on Emerging Technologies. Washington D. C., USA; IEEE Press, 2015, 1-6.
- [9] 尹诗白. 基于模糊集合理论的颗粒目标分割和识别[D]. 西安: 长安大学, 2013.
- [10] 徐传运. 宫颈细胞学涂片自动判读方法研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2014.
- [11] SMAL I, LOOG M, NIESEN W, et al. Quantitative comparison of spot detection methods in fluorescence microscopy [J]. IEEE Transactions on Medical Imaging, 2010, 29(2): 282-301.
- [12] PAUL V, MICHAEL J J. Robust real-time face detection [J]. International Journal of Computer Vision, 2004, 57(2): 137-154.
- [13] RICHARD M P, RUSSELL S H. A PAR-1-dependent orientation gradient of dynamic microtubules directs posterior cargo transport in the drosophila oocyte [J]. The Journal of Cell Biology, 2011, 194(1): 121-135.
- [14] 朱峰. 一种基于多尺度 LBPH 特征的快速人脸识别算法 [J]. 计算机应用与软件, 2015, (8): 315-319.
- [15] 李伟生, 宋吴斌, 周丽芳. 基于 Haar 小波和保局投影的人脸识别 [J]. 计算机工程, 2011, 37(18): 188-189.
- [16] 吴学成, 王怀, 浦世亮, 等. 数字共轴全息中颗粒识别与定位 [J]. 浙江大学学报(工学版), 2010, 44(4): 765-770.

编辑 赵辉

(上接第 250 页)

- [12] 李双建, 滕奇志, 何小海. 基于 HSV 空间的高动态范围彩色显微图像合成 [J]. 四川大学学报(自然科学版), 2013, 50(1): 41-45.
- [13] 陈军, 胡福乔. YUV 空间的彩色图像 HDR 合成算法 [J]. 计算机工程, 2012, 38(9): 214-216.
- [14] REINHARD E, DEVLIN K. Dynamic range reduction inspired by photoreceptor physiology [J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2005, 11(1): 13-24.
- [15] REINHARD E, WARD G, PATTANAIK S, et al. High dynamic range imaging-acquisition, display, and image-

based lighting [M]. [S. l.]: Princeton University Press, 2010: 29-35, 58.

- [16] CONZALE Z R, WOODS R, EDDINS S. 数字图像处理的 MATLAB 实现(第 2 版) [M]. 阮秋琦, 译. 北京: 清华大学出版社, 2013: 224.
- [17] WANG Z, BOVIK A C, SHEIKH H R, et al. Image quality assessment: from error visibility to structural similarity [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2004, 13(4): 600-612.

编辑 司森森