

基于图像处理的蔗糖结晶颗粒识别方法^①

张振升 朱名日 潘泽锴 (桂林电子科技大学 计算机与控制学院 广西 桂林 541004)

摘要: 针对煮糖过程蔗糖结晶图像的特点采用颜色空间转换的方法,将图像从 RGB 颜色空间转换为 HIS 颜色空间,利用 HIS 颜色空间各分量相对独立性以及结晶颗粒和糖浆溶液的色调差异通过改进的大津法对 H 分量进行阈值分割,再通过数学形态学,中值滤波,孔洞填充,去除噪声颗粒等方法进行后续处理,最后对处理后的图像提取结晶颗粒的个数、面积、周长、形状指数以及面积比等特征值并进行分析来完成煮糖过程中蔗糖结晶颗粒的识别。实验证明该方法识别率高,切实可行。

关键字: HIS; 改进的大津法; 数学形态学; 孔洞填充; 噪声颗粒; 特征提取; 结晶颗粒识别

A Method to Identify Sucrose-Crystallizing Particles Based on Image-Processing

ZHANG Zhen-Sheng, ZHUMing-Ri, PAN Ze-Kai

(Computer and Control Department, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China)

Abstract: Based on the characteristics of sucrose-crystallizing images in the sugar-boiling process, this paper uses a method called color space conversion which changes the images from RGB color space into HIS color space, and makes use of the relative independence of every component in the HIS color space and the color difference between crystal particles and syrup solution to segment the H component with the improved Otsu's thresholding method. Many ways are used in the subsequent processing, such as mathematical morphology opening operation, median filter, holes filled, noise removing process of particles in the subsequent processing. Finally, the identification of sucrose-crystallizing particles in the process of boiling sugar is made by analysing the feature value such as the number, size, perimeter, shape index and the area ratio of the crystalline particles extracted from the processed images. Experiments show that this method is effective and practical.

Keywords: HIS; improved Otsu method; mathematical morphology; holes filled; noise particles; feature extraction; identification of crystalline particles

1 引言

目前,国内外制糖业中除了煮糖阶段仍采用间歇法外,其余工序都已经基本实现了生产中的自动化控制。大部分糖厂煮糖工序操作中,其结晶环节仍需要人工目测来不断的观察煮糖罐内糖精核的形成和晶粒的成长状况来完成检测^[1]。虽然现在也有一些制糖企业用在线检测糖溶液饱和度来实现煮糖工序的自动控制,但这些方法都是控制蔗糖结晶的间接检测方法,

没有实现煮糖过程中糖液结晶过程的可视化操作,更不能直观在线实时地观察和准确判断糖罐内的糖晶体结晶质量情况。因此本文提出了将图像处理技术应用于煮糖过程中的蔗糖结晶检测中,特别是对其中的煮糖过程中的蔗糖结晶颗粒图像处理和识别方法进行研究,来获得结晶颗粒的个数、面积、周长、形状指数以及面积比等参数将其传输给煮糖控制系统,以利于实现煮糖过程结晶环节的在线实时决策控制,达到实

① 基金项目:广西教育厅科研基金(200808LX138);广西科技厅科技攻关基金(0428007-9)

收稿时间:2009-07-21

现煮糖过程自动化的目的。

2 煮糖过程蔗糖结晶图像的特点、处理及识别流程

2.1 采集到的煮糖过程中的蔗糖结晶图像和图像特点

笔者通过光学显微镜和 CCD 摄像头采集煮糖过程蔗糖结晶的原始图像，并将其输入到 PC 机中，然后在 PC 机上对图像进行一系列的处理和分析后进行特征提取，最终得到颗粒个数、面积、周长、形状指数以及面积比等特征值。

由于受糖厂采集现场环境噪声大和图像采集系统本也存在噪声以及采集现场光照不均等因素的影响，笔者采集到的煮糖过程中的结晶图像中存在糖浆和晶体混杂、局部亮度不均匀、结晶颗粒呈淡棕黄色、存在气泡和噪声等现象，图像信息比较复杂。图 1 即采集的一帧结晶颗粒的原始图像。

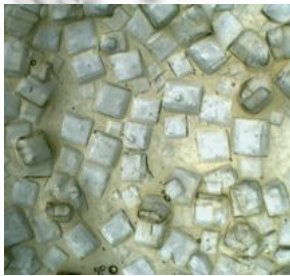


图 1 一帧蔗糖结晶颗粒的原始图像

2.2 蔗糖结晶图像的处理及识别流程

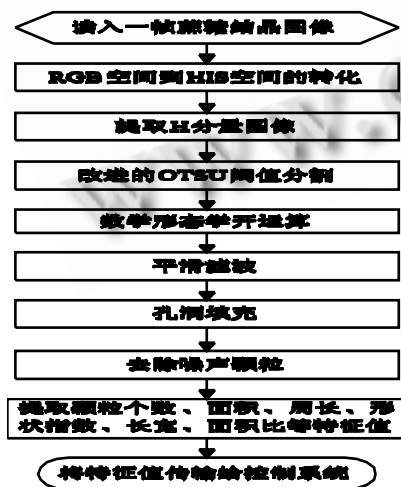


图 2 蔗糖结晶图像处理与识别流程图

从采集的原始图像特点和复杂的图像信息来看，

图像在 RGB 颜色模型下很难处理。因此本文提出了利用 HIS 空间三个分量的相对独立性提取 H 分量，利用结晶颗粒和糖浆溶液的色调差异采用了如图 2 所示的处理及识别流程。

3 煮糖过程蔗糖结晶图像处理和识别过程

3.1 RGB 颜色模型到 HIS 颜色模型的转化

在图象处理中经常应用的彩色空间模型有两种。一种是由 R、G、B 三原色组成的彩色立方体空间，即 RGB 模型，它是面向硬设备最常用的彩色模型；另一种是面向彩色处理的最常用的彩色六棱锥空间，即 HIS 模型。其中 H 表示色调(hue)，用来区分不同的颜色；S 表示饱和度(saturation)，用来表示某种颜色的纯度；I 表示密度(intensity)，对应成亮度和图像灰度。

在 HIS 空间中三分量 H、I、S 具有相对独立性，可分别对它们进行控制，能够准确的描述颜色特征，它将亮度与反映色彩本质特征的两个参数色调 H 和饱和度 S 分开，使得图像处理的时候能够针对性更强。而色调和饱和度与红、绿、蓝各分量的关系是非线性的，在 RGB 空间中对图像进行分析和处理时难以控制其结果，具体的图像处理和显示函数都只能通过 RGB 模型来表达。工业现场采集到的煮糖过程中的 RGB 颜色模型的结晶图像，糖浆溶液和晶体混杂在一起，并且图像照度不均匀，结晶颗粒和背景糖浆溶液亮度相近，在 RGB 模型中两者很难分离。基于此笔者提出将结晶图像从 RGB 颜色空间转换到 HIS 颜色空间，利用 HIS 颜色模型下糖浆溶液和结晶颗粒的色调差异以及 HIS 颜色空间中 H、I、S 三分量的相对独立性，提取 H 分量对其进行阈值分割，避免照度不均匀等因素对图像处理带来的影响，经过实验此方法相对 RGB 模型下的处理效果好。

RGB 颜色空间到 HIS 颜色空间的转换原理如下：

对任何 3 个在 [0,1] 范围内的 RGB 值，其对应的 HIS 模型中的 I,S,H 分量可有下面给出的公式计算^[2]：

$$I = \frac{1}{3}(R + G + B) \quad (1)$$

$$S = 1 - \frac{3}{R + G + B} [\text{Min}(R, G, B)] \quad (2)$$

$$H = \begin{cases} \theta, & B \leq G \\ 2\pi - \theta, & B > G \end{cases} \quad (3)$$

其中， $\theta = \arccos \left\{ \frac{[(R - G) + (R - B)]/2}{[(R - G)^2 + (R - B) + (G - B)]^{1/2}} \right\}$ 。

图 1 转换到 HIS 颜色空间后的图像以及提取的 H 分量图像分别如图 3、图 4 所示。

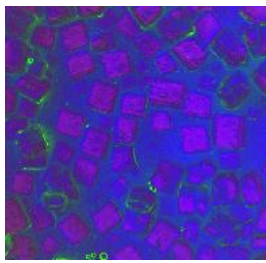


图 3 HIS 颜色空间图像

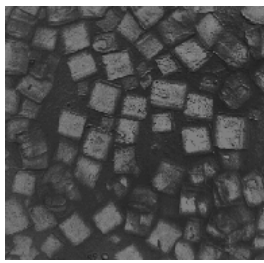


图 4 H 分量图像

3.2 对 H 分量采用改进的大津法选取阈值进行分割

对于灰度图像的分割方法有很多，像是直方图灰度分布选择阈值法、双峰法、迭代法、大津法、最大熵方法等，这些方法各有特点，如迭代法分割效果可以，但对图像细微区域的区分度不高；最大熵方法对不同目标大小和信噪比的图像均有比较好的效果且受目标大小的影响很小，但此方法涉及对数运算，运算速度慢，不利于实时处理。通过多次实验，综合处理速度以及图像分割优劣来看，大津法能够自动的对图像阈值化而且实验效果较好。

大津法^[3,4]属于最大类间方差法，由日本学者大津于 1979 年提出的一种自适应的阈值确定方法，简称 OTSU。它主要依据概率统计与最小二乘原理，基于整幅图像的灰度特性实现阈值自动选取。其阈值选取的数学原理如下：

假定一帧蔗糖结晶图像的灰度分为 k 级且灰度值 i 的像素数为 n_i ，则总像素数 $N = \sum_{i=1}^k n_i$ ，各像素值概率 $P_i = n_i / N$ 。然后用一整数 h 将其分为前景和背景两组，前景 $B_0 = \{1, 2, \dots, h\}$ ，背景 $B_1 = \{h+1, h+2, \dots, k\}$ 。设 B_0 、 B_1 产生的概率分别 ω_0 、 ω_1 ，均值为 μ_0 、 μ_1 ，且令 $\mu(h) = \sum_{i=1}^h iP_i$ 。则

$$\omega_0 = \sum_{i=1}^h P_i = \omega(h) \quad \omega_1 = \sum_{i=h+1}^k P_i = 1 - \omega(h) \quad (4)$$

$$\mu_0 = \sum_{i=1}^h iP_i / \omega_0 = \mu(h) / \omega(h) \quad \mu_1 = \sum_{i=h+1}^k iP_i / \omega_1 = [\mu - \mu(h)] / [1 - \omega(h)] \quad (5)$$

其中， $\mu = \sum_{i=1}^k iP_i$ 是整体图像灰度的统计均值，则

$$\mu = \omega_0 \mu_0 + \omega_1 \mu_1 \quad (6)$$

且两类间方差

$$\sigma^2 = \omega_0(\mu_0 - \mu)^2 + \omega_1(\mu_1 - \mu)^2 = \omega_0 \omega_1 (\mu_1 - \mu_0)^2 \quad (7)$$

则 $h \in \{1, 2, \dots, k\}$ ，且使得方差取得最大值 $\max \sigma^2(h)$ 时

h 值即为最佳阈值。

OTSU 阈值选取算法的改进：从上述阈值选取的原理可以看出，背景和目标之间的类间方差越大，说明构成图像的两部分的差别越大。当部分目标错分为背景或部分背景错分为目标都会导致两部分差别变小造成错分。因此，阈值选取的要求应该使类间方差尽可能大，同时类内各像素和类内中心的距离越小越好。基于此笔者采用类内平均方差代替类内均值并定义类离散度对原阈值选取方法进行改进。设 B_0 和 B_1 的平均方差为 σ_0^2 和 σ_1^2 ，类离散度为 d 。则

$$\sigma_0^2 = \sum_{i=1}^h (i - \mu_0)^2 P_i / \omega_0 \quad (8)$$

$$\sigma_1^2 = \sum_{i=h+1}^k (i - \mu_1)^2 P_i / \omega_1 \quad (9)$$

$$d = \omega_0 \sigma_0^2 + \omega_1 \sigma_1^2 \quad (10)$$

由上式可以看出 d 越小分类的内聚性越好，同时要使 σ^2 越大，本文采用如下改进的阈值求取公式：

$$g(h) = \omega_0 \omega_1 \sigma^2 / d = \omega_0^2 \omega_1^2 [\mu_0(h) - \mu_1(h)]^2 / [\omega_0 \sigma_0^2(h) + \omega_1 \sigma_1^2(h)] \quad (11)$$

最终求得的最佳阈值 T ，即

$$T = \arg \max_{h \in [1, k]} [g(h)] \quad (12)$$

用大津法和改进的大津法选取阈值对 H 分量即图 4 分割后的图像如图 5、图 6 所示。从两图对比可以看出改进的 OTSU 分割效果更好有着更好的自适应性因为同时考虑到类内像素的内聚性的影响，使得改进后的方法有更好的实用性。

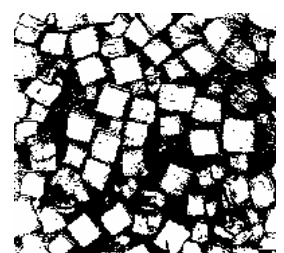
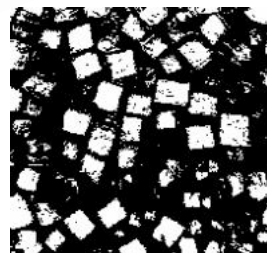


图 5 H 分量大津法 图 6 H 分量改进的大津法 分割 分割

3.3 阈值分割后的图像进行形态学运算

常见的形态学运算^[5]主要包括腐蚀、膨胀、开运算、闭运算等。在对 H 分量进行阈值分割以后，为了

去除的分割后出现的一些比较小的噪声点，在纤细点处分离晶体的特定细节，平滑较大晶体的边界，同时保证不产生全局的几何失真，本文选择了主要针对二值图像的形态学开运算对改进的大津法分割后的图像进行处理。

开运算是一个先腐蚀后膨胀的过程。利用该运算可以消除二值图像的小物体，在纤细点处分离物体，平滑较大物体的边界，但同时不明显改变原来物体的面积。

给定二值图像 $I(x,y)$ 和作为结构元素的二值模板 $T(i,j)$ ，腐蚀、膨胀三种运算可表示为：

腐蚀：

$$E(x,y) = (I \ominus T)(x,y) = \bigwedge_{i,j=0}^m [I(x+i,y+j) \& T(i,j)] \quad (13)$$

膨胀：

$$D(x,y) = (I \oplus T)(x,y) = \bigvee_{i,j=0}^m [I(x+i,y+j) \& T(i,j)] \quad (14)$$

开运算：

$$OPEN(I,T) = (I \circ T) = (I \ominus T) \oplus T \quad (15)$$

根据图像中结晶颗粒的形状特点，笔者经过多次实验选取了 5×5 像素单位的方形结构元素对改进大津法分割后的图像进行开运算消除部分二值图像的小物体，把比结构元素小的突刺滤掉，切断细长搭接而起到分离作用取得比较好的效果。图 6 开运算后的图像如图 7 所示。

3.4 平滑滤波

对于开运算处理之后的图像，为了达到既能消除没有去除的噪声又要保持图像细节和平滑颗粒边缘的效果，本文通过实验选择了中值滤波算法进行平滑滤波。

中值滤波^[6]是基于排序的非线性滤波的典型，它是对一个滑动窗口内的诸像素灰度值排序，用其中值代替窗口中心像素的灰度值的滤波方法。其主要功能就是让周围像素的灰度值的差比较大的像素改取与周围像素值接近的值，从而可以消除孤立的噪声点。由于它不是简单的取均值，所以产生的模糊比较少，它能在保留需要的图像结构的同时消除(脉冲)噪声。中值滤波的公式表示如下：

$$g(x,y) = Median\{f(x-i,y-j)\}, (i,j) \in S \quad (16)$$

其中， $g(x,y)$ ， $f(x,y)$ 分别为输出输入图像的像素灰度值， S 为模板窗口。

笔者经过实验选用 3×3 方形窗口的中值滤波模板。经过 3 次中值滤波后，图像噪声被去除，而且图像边缘保护得比较好。图 7 经中值滤波处理后得到的图像如图 8 所示。

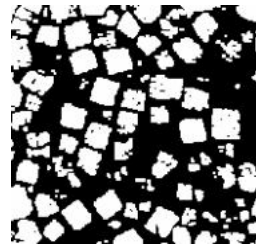


图 7 对图 6 进行形态学开运算

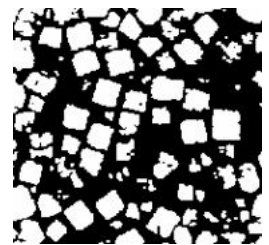


图 8 中值滤波后的图像

3.5 孔洞填充

由于采集的图像本身受噪声和气泡等因素的影响，在经过 H 分量的改进的大津法阈值分割后会在颗粒图像上出现一些孔洞。因此，为了减小后续特征提取的误差，必须对这些连通区域出现的孔洞进行填充。其填充原理如下：

全图扫描确定连通区域的个数并作标记^[7]，然后在每个连通区域内统计连通区域的面积，总会有一个面积特别大的区域，其他都是面积比较小的或者很小的区域，较小的或者很小的往往就是要填充的孔洞了。填充函数采用递归函数，在将自身这点变为白色之后，向 8 邻域方向寻找黑色的点将其变为白色。对图 8 孔洞填充后的图像如图 9 所示。

3.6 去除噪声颗粒

在孔洞填充后，为了去除后续特征提取中小块的干扰区域提取符合要求的晶粒信息，将图像中面积过小的颗粒作为噪声去除。首先根据连通区域的个数和区域内的像素点数和确定晶体个数和面积^[7]，然后设定一个面积大小为 200 像素的阈值，将颗粒面积小于该阈值的区域填充为背景，以达到去除干扰的目的。图 9 去除噪声颗粒后的图像如图 10 所示。

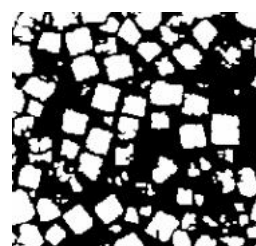


图 9 孔洞填充

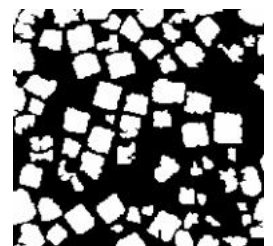


图 10 去除噪声颗粒

3.7 特征值提取

经过上述一系列的图像处理之后得到了如图 10 所示的背景和结晶颗粒分割良好的二值图像，然后提取结

晶颗粒个数、面积、周长、形状指数以及颗粒的总面积占图像中的面积比等特征值,最后将其传输给控制系统以利于控制系统的决策。特征值的提取步骤如下:

① 对去除噪声颗粒后的图像对进行连通区域的标记^[7]。

② 全图扫描,根据连通区域的标记,统计连通区域的个数即结晶颗粒数,每个连通区域内的像素点数即为颗粒的面积数,提取每个连通区域的边缘点数并且在垂直、水平方向上增大 $\sqrt{2}$ 倍进行周长校正,最后根据求得颗粒周长和面积之间的关系比值求得形状指数。

③ 将所有连通区域的像素点数与图像的总像素点数相比较即得到颗粒的总面积与图像面积的比值。

4 实验结果及分析

笔者通过光学显微镜和 GRI30BCM CCD 摄像头采集煮糖过程中的原始蔗糖结晶颗粒图像(如图 1),由图 9 可以看出按照本文提出的方法(如图 2 所示)对原始图像(如图 1)进行一系列处理之后蔗糖结晶颗粒已经很好的从复杂的糖浆背景中分割出来,相互粘连的蔗糖颗粒之间的分割也比较理想。对图 10 进行特征值提取的结果如图 11 所示。



图 11 结晶颗粒的特征值提取

图 11 为经过特征值提取后的界面,显示的颗粒个数、面积、周长、形状指数、长宽、面积比等特征值,其中面积大小是以像素为单位表示的相对值。如图 11 所示,实际原始图像中符合要求的颗粒数为 77,识别出的颗粒数为 74,识别率为 96.1%,符合蔗糖颗粒测量的误差要求。

另外笔者将在项目合作单位广西某糖厂采集的 50 组煮糖过程中的蔗糖结晶样本图像通过本文方法进行处理识别后得到的识别颗粒数与样本中的实际符合要求的颗粒数绘制数据点折线图(如图 12 所示)进行

比较,由图中结果可以看出识别结果与实际复合要求的颗粒数基本相符合。实验结果显示识别误差仅为 0.033075,符合测量的精度要求。

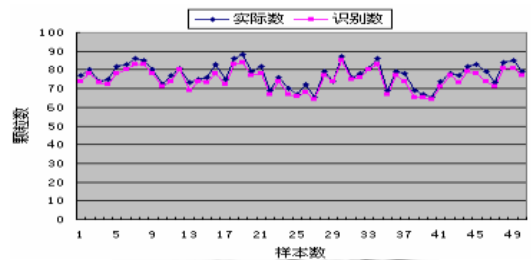


图 12 样本识别结果比较折线图

实际煮糖生产过程中,工人通过目测观察结晶颗粒的大小,粗略估算达到标准大小的蔗糖颗粒所占百分比,然后进一步控制原蜜、甲稀和水的加入量,使蔗糖颗粒能充分结晶。由实验结果可以看出本文提出的蔗糖结晶图像的识别方法切实可行,其提取的结晶颗粒个数、面积、周长、形状指数以及面积比等特征值传输到控制系统之后能够为煮糖控制系统的决策提供依据,进而实现煮糖过程的自动化控制。

5 结论

采集的煮糖过程的蔗糖结晶图像信息量大,结晶颗粒和糖浆溶液亮度相近并且存在气泡、噪声,并受图像采集现场的图像光照局部不均匀等因素影响,图像信息十分复杂,传统的 RGB 模型下很难进行处理得到比较准确特征值。由实验结果可以看出,本文提出的基于图像处理的蔗糖结晶颗粒识别方法,其结晶颗粒识别率较高,能够比较准确的得到图像中结晶颗粒个数、面积、周长、形状指数以及面积比等参数,能为判断煮糖过程中晶粒的结晶程度和下一步进行的操作提供比较准确的依据,对实现煮糖过程的真正自动化有着积极的意义。

参考文献

- 1 陈维钧,许斯欣等.甘蔗制糖原理与技术.北京:中国轻工业出版社,2001.1-3.
- 2 Smith AR. Color gamut transform pairs. Computer Graphics, 1978, 12(3):12-19.
- 3 Otsu. A threshold selection method from gray-level (下转第 34 页)

- histogram. IEEE Transom SMC29(1), 1979.62 – 66.
- 4 周云燕,杨坤涛,黄鹰.基于最小类内离散度的改进 Otsu 分割方法的研究.华中科技大学学报(自然科学版), 2007,35(2):101 – 103.
 - 5 戴青云,余英林.数学形态学在图像处理中的应用进展.控制理论与应用, 2001,18(4):478 – 481.
 - 6 冈萨雷斯.数字图像处理(第 2 版)(阮秋奇等译).北京:电子工业出版社, 2003.
 - 7 李仪芳,刘景琳等.基于连通域算法的区域测量.科学技术与工程, 2008,8(9):2492 – 2494.