

基于计算机视觉的海产品抗生素残留检验方法^①

徐利军¹, 黄河², 庞全¹

¹(杭州电子科技大学 生物医学工程与仪器研究所, 杭州 310018)

²(杭州斯凯网络技术有限公司, 杭州 310013)

摘要: 针对海产品抗生素残留传统检验方法存在劳动强度大、重复性高的问题, 研究并建立了基于计算机视觉的抗生素残留自动检验系统, 该系统包含抑菌圈图像的自适应降噪和背景校正、多分辨率的二次抑菌圈检测拟合、以及符合国家标准的抗生素残留计算方法. 以海产品中四环素族抗生素残留检测进行的试验表明, 本文研究的方法具有速度快、精度高、操作简便等优点, 开发的系统能够满足部分抗生素残留的检测需要. 理论分析和试验证明了该系统的优点和有效性.

关键词: 计算机视觉; 抗生素残留; 自动检测; 自适应降噪

Method of Inspection of Antibiotic Residues on Seafood Based on Computer Vision

XU Li-Jun¹, HUANG He², PANG Quan¹

¹(Biomedical Engineering and Instrument Research Institute, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China)

²(Sky Network Technology Co. Ltd, Hangzhou 310013, China)

Abstract: According to the traditional method of inspection antibiotic residues on seafood, it exists Labor-intensive and highly Repetitive, this article researched and established the automatic inspection system of antibiotic residues based on computer vision. The system include the image of inhibition zone's adaptive de-noise and background correction, quadratic bacteriostatic ring fitting based on multiresolution, the compute method of antibiotic residues which meets the national standards. The antibiotic residues inspection of seafood tetracyclines show that the method in this article has the advantages like high speed, high accuracy and easy to operate etc. We developed the system is enough to satisfy the demand of partial antibiotic residues' inspection. Theory and experimental results have shown the system's advantages and effectiveness.

Key words: computer vision; antibiotic residues; automatic inspection; adaptive noise reduction

有数据表明, 世界上抗生素产量的一半左右被用于畜牧养殖业. 抗生素药物在有效抑制动物疾病的同时, 也引发越来越多的食品安全事件, 给人类健康乃至生命安全带来危害. 国家标准规定的《抗生素残留量检验方法》因其准确灵敏的特点一直是进出口商品的标准检测方法. 但该方法要求对上百个抑菌圈进行测量和分析, 其操作复杂计算量大, 传统上一直靠人工肉眼观察和手工计算, 劳动强度极大^[1]. 因此, 发展快速准确方便且符合国家标准的抗生素残留检测技术

与分析系统, 成为一项重要课题.

本论文旨在研究计算机视觉、并符合国家《抗生素残留量检验方法》标准的海产品抗生素残留自动检测系统. 该系统由抑菌圈图像提取及处理、抑菌圈自动测量及拟合、以及抗生素残留自动分析三部分组成. 文章研究并建立了对抑菌圈图像的自适应降噪和背景光照均匀性校正, 以提高抑菌圈图像的质量. 针对实际操作中抑菌圈数量多且检测精度要求高的特点, 文章在对传统 Hough 变换圆检测进行改造的基础上, 建

① 基金项目:浙江省科技计划重点项目(2009C33003)

收稿时间:2012-06-01;收到修改稿时间:2012-07-01

立了多分辨率的二次抑菌圈检测拟合技术, 形成在低分辨率上快速检测、高分辨率上局部精确检测拟合的方法, 实现对批量抑菌圈既快又准确的检验方法. 再以四环素族抗生素残留量进行检测的试验表明, 本文研究的方法和系统具有速度快精度高操作简单等优点, 已能满足部分抗生素残留检测的需要.

1 系统构成

计算机视觉的抗生素残留量自动检测系统的总体

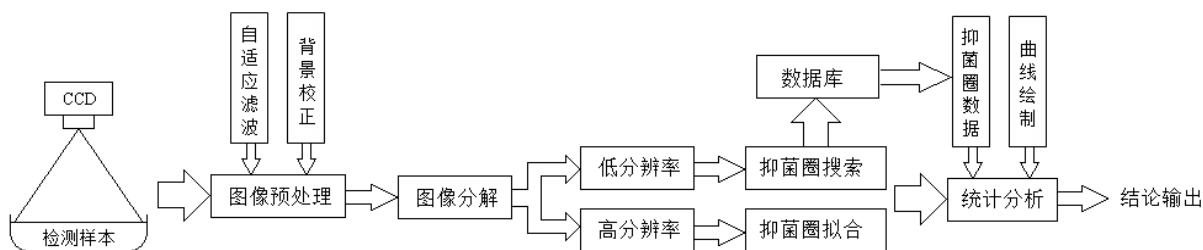


图 1 海产品抗生素残留自动检验系统结构

2 抑菌圈图像预处理

噪声是所有 CCD 图像提取所不可避免的, 因此需要对图像进行降噪处理. 此外, 抑菌圈和培养基的图像对比度通常很低, 加上因培养基倾注不均匀而导致图像背景亮度不均匀, 将给抑菌圈检测带来很大困难, 需要事先进行图像背景的均匀性校正.

2.1 抑菌圈图像的自适应降噪

考虑到均值滤波对高斯噪声有良好的抑制作用、中值滤波对脉冲噪声有较好的滤除效果、而加权中值滤波可以有效地保护细节^[2]. 因此, 本文拟建立能自动针对不同噪声实现不同滤波的自适应滤波方法如下.

首先对图像中的像素点进行分类. 假设采用 5×5 滑动窗口, 中心像素点 (x, y) 为待检测像素, 灰度值为 $f(x, y)$, 点 (i, j) 为像素点 (x, y) 八邻域中的一个像素, 定义窗口中心像素 (x, y) 在 o 方向上的差分为:

$$d_o(x, y) = |f(i, j) - f(x, y)| \quad (1)$$

经过中心像素点等间隔的取 8 个检测方向, 每个方向上选择四个点, 分别计算各点之间的差分值如下:

$$d_o(x-1, y-1) = |f(x, y) - f(x-1, y-1)| \quad (2)$$

$$d_o(x, y) = |f(x+1, y+1) - f(x, y)| \quad (3)$$

$$d_o(x+1, y+1) = |f(x+2, y+2) - f(x+1, y+1)| \quad (4)$$

结构如图 1 所示. 其工作原理如下: 采用 CCD 获取抑菌圈图像, 对图像进行必要的预处理, 降低噪声影响, 校正背景光源造成的图像畸变, 然后进行分割得到抑菌圈的边缘信息. 进一步通过本文建立的算法, 检测出抑菌圈的直径数据, 经过选择标志后保存到数据库. 集合所有抑菌圈数据, 统计计算并输出标准曲线. 测量样本的抑菌圈直径数据, 根据标准曲线换算样本的残留量值. 对多次测量结果进行平均后作为最后的检测结果.

式中下标 o 表示像素的检测方向. 如果像素点 (x, y) 在某个 o 方向上为细节点, 那么 $D_o(x, y) > K_1$ 将成立. 其中:

$$D_o(x, y) = 2 \times d_o(x, y) - d_o(x-1, y-1) - d_o(x+1, y+1) \quad (5)$$

用 N 表示点 (x, y) 被检测为细节点的方向数. 若 $N=0$, 该点为非细节点, 采用均值滤波; 设定阈值 K_2 , 若 $N > K_2$, 则是脉冲噪声点, 采用中值滤波; 剩下的就是细节点, 为最好地保留细节信息, 采用加权中值滤波算法. 这里阈值 K_2 的作用是区分细节点和噪声点, 实际应用中根据实际情况进行调整.

2.2 背景光的均匀性校正

本背景不均匀, 使对抑菌圈边缘分割比较困难. 同态滤波增强, 是把频率过滤和灰度变换结合起来, 利用压缩灰度范围和增强对比度来改善图像^[3]. 本文采用同态滤波实现对抑菌圈图像背景光照不均匀的矫正.

用 $f(x, y)$ 二维函数形式来表示图像, 其由两个分量来表征: 1) 入射到观察场景的景物上的光源总量 $i(x, y)$, 称为入射分量; 2) 场景中物体反射光的总量 $r(x, y)$, 称为反射分量. 则 $f(x, y)$ 可表示为:

$$f(x, y) = i(x, y) \cdot r(x, y) \quad (6)$$

这里:

$$0 < i(x,y) < \infty \tag{7}$$

$$0 < r(x,y) < 1 \tag{8}$$

式(8)表示反射分量 $r(x,y)$ 介于 0(完全吸收)和 1(完全反射)之间. $i(x,y)$ 的性质取决于光源, $r(x,y)$ 的性质取决于物体表面的反射特性. 利用这个照度-反射模型可进行频域处理, 同时进行灰度范围压缩和对比度增强以改善光照亮度不均匀的影响.

对式(6)两边取对数后再作傅里叶变换, 可得:

$$F_r(u,v) = F_i(u,v) + F_r(u,v) \tag{9}$$

$F_i(u,v)$ 、 $F_r(u,v)$ 、 $F_r(u,v)$ 分别为函数 $\ln f(x,y)$ 、 $\ln i(x,y)$ 、 $\ln r(x,y)$ 的傅里叶变换.

图像取对数后得傅立叶变换的低频部分主要对应照度分量, 而高频部分主要对应反射分量. 用一个频域函数 $H(u,v)$ 处理 $F_r(u,v)$, 可得到:

$$H(u,v)F_r(u,v) = H(u,v)F_i(u,v) + H(u,v)F_r(u,v) \tag{10}$$

对式(10)进行傅立叶逆变换到空间域, 符号 F^{-1} 表示傅立叶逆变换, 可得:

$$F^{-1}(F_r(u,v)) = F^{-1}(F_i(u,v)) + F^{-1}(F_r(u,v)) \tag{11}$$

最后再对式(11)两边取指数, 得到校正后的图像 $g(x,y)$:

$$\begin{aligned} g(x,y) &= \exp\{F^{-1}(F_r(u,v))\} \\ &= \exp\{F^{-1}(F_i(u,v)) + F^{-1}(F_r(u,v))\} \end{aligned} \tag{12}$$

整个处理流程如图 2 所示. 同态滤波函数需要压缩灰度范围, 对应频域内减少低频部分的影响, 而增加高频部分对图像的贡献.

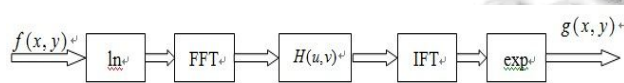


图 2 同态滤波的背景光照均匀性校正

3 二次拟合的抑菌圈检测

3.1 Hough 变换圆检测^[4]

Hough 变换圆检测因具有抗干扰能力强、检测精度高等特点, 是圆检测算法中最经典应用最广泛的一种方法. Hough 变换圆检测的基本原理, 是根据数学对偶性原则, 将圆方程由空间 $R(x,y)$ 映射到参数空间 $R(a,b,r)$.

$$(x-a)^2 + (y-b)^2 = r^2 \tag{13}$$

考虑空间 $R(x,y)$ 中的一个边缘点 (x_0,y_0) 对应参数空间 $R(a,b,r)$ 中的一个曲面, 曲面上的每一个点 (a',b',r') 为空间 $R(x,y)$ 中经过点 (x_0,y_0) 的某个圆的参数. 如果固定参数 $r=r'$, 则在平面 $R(a,b)$ 上, 点 (x_0,y_0) 对应经过 (x_0,y_0) 且半径为 r' 的圆的圆心集合, 这个集合为一个以 (x_0,y_0) 为圆心, r' 为半径的圆. 对参数空间内所有的点, 累计对应的边缘点个数, 累计值高于一定阈值即可认为该点所代表的圆参数存在对应的圆曲线. 图 3 显示了 4 个点映射到参数空间 $R(a,b,r)$, 在 $r=r'$ 切面上的结果. 可见点 (a',b') 有 4 个圆的边缘经过, 累计值最多, 因此 (a',b',r') 可以判断为候选参数.

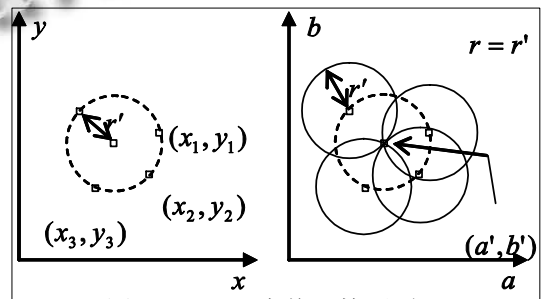


图 3 Hough 变换圆检测原理

3.2 多分辨率二次检测

Hough 变换圆检测精度高抗噪能力强, 适合用来进行对抑菌圈的检测. 然而对图像分辨率较高、存在的抑菌圈数量很多的情况下, 其处理速度不够理想. 为此, 本文提出多分辨率^[5]的二次抑菌圈检测, 思路如下.

1) 对抑菌圈图像进行多分辨率分解, 得到各个分辨率的子图. 如图 4 所示.

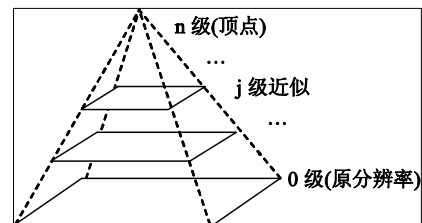
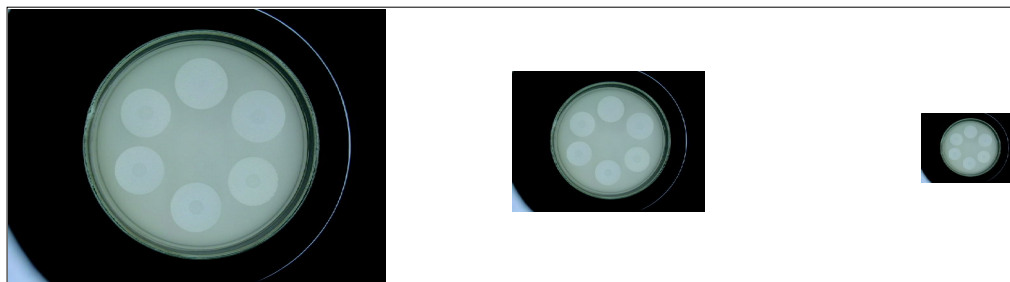


图 4 抑菌圈图像的金字塔分解

2) 用 Hough 变换对低分辨率图像进行圆检测, 得到抑菌圈的个数和参数范围.

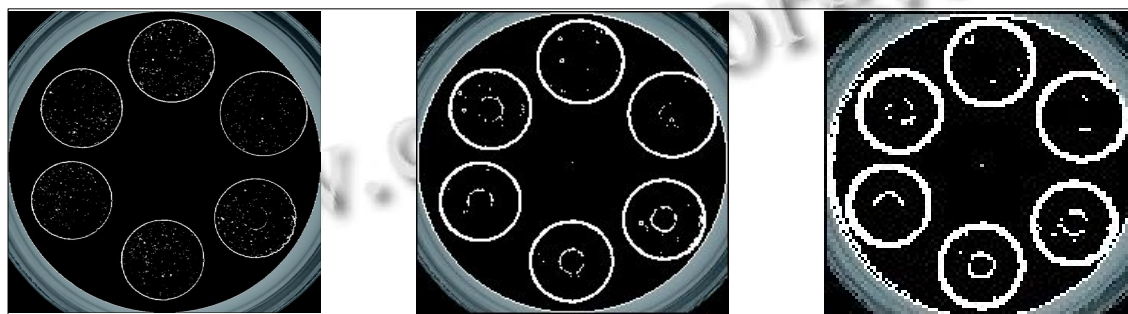
3) 利用第 2)步得到的圆信息, 在高分辨率图像上进行局部 Hough 变换圆检测, 得到抑菌圈的精确边界.

对一幅抑菌圈图像的多分辨率分解如图 5 所示, 边缘检测结果如图 6 所示.



(a)原图 (b) $j=2$ 分解后的图像 (c) $j=3$ 分解后的图像

图 5 多分辨率分解结果



(a)边缘图像 (b) $j=2$ 边缘图像 (c) $j=3$ 边缘图像

图 6 多分辨率边缘检测结果

3.3 最小二乘法抑菌圈拟合

前面所述算法, 在低分辨率图上可得初步的圆参数信息. 高分辨率图像上对应的圆边缘已经被最佳匹配的圆. 这时, 曲线拟合是计算量最小时空效率最高的方法^[6]. 因此可以采用最小二乘法来进行抑菌圈曲线的拟合.

圆的标准公式为

$$R^2 = (x-A)^2 + (y-B)^2 \quad (14)$$

展开可得:

$$R^2 = x^2 - 2Ax + A^2 + y^2 - 2By + B^2 \quad (15)$$

设 $a = -2A$ 、 $b = -2B$ 、 $c = A^2 + B^2 - R^2$, 则可得圆曲线方程的另一个形式:

$$x^2 + y^2 + ax + by + c = 0 \quad (16)$$

只要求出参数 a, b, c 就可以通过(14)、(15)、(16)求得圆心、半径等参数. 详细参文献[6].

4 抗生素残留量的分析计算与试验

按国家《抗生素残留量检验方法》(2007)规定流程, 试验如下.

4.1 抑菌圈测量与标准曲线绘制

以含量最低的标准浓度 (四环素为 $0.025 \mu\text{g/mL}$) 的 3 个平板作为产生阴性结果的平板对照, 其他 12 个检定用平板用来绘制标准曲线, 这样参考浓度 $0.100 \mu\text{g/mL}$ 的稀释液将得出 45 个抑菌圈直径数值, 标准曲线上其他标准浓度将得出 9 个抑菌圈直径数值.

精确测量各抑菌圈直径, 求出检定用平板上 $0.100 \mu\text{g/mL}$ 浓度的抑菌圈直径读数与其他标准浓度的抑菌圈直径读数的平均值, 再求出参考浓度 $0.100 \mu\text{g/mL}$ 的所有 45 个抑菌圈直径读数的平均值作为标准曲线的校正点, 来校正其他各标准浓度的抑菌圈读数的平均值.

将校准后的值在双周半对数坐标图纸上, 以抑菌圈直径为横坐标, 以 $\mu\text{g/mL}$ 计的浓度为纵坐标, 以式(17)、(18)绘出最佳直线.

$$L = (3a + 2b + c - e) / 5 \quad (17)$$

$$H = (3e + 2d + c - a) / 5 \quad (18)$$

4.2 统计计算与结果分析

根据式(17)、(18)可以得到 L 、 H 的值. 在双周半

对数坐标上, 标准曲线为经过点 (L,lg0.050)、(H,lg0.800) 的直线, 可得标准曲线方程为:

$$y = \frac{\lg 0.800 - \lg 0.050}{H - L}x + (\lg 0.800 - \frac{\lg 0.800 - \lg 0.050}{H - L}H) \quad (19)$$

假设同批检验的样本有 n 个, 以 R_{kj} 表示第 k 个样本样液的第 j 个抑菌圈数据值, S'_{kj} 表示标准参考浓度溶液的抑菌圈数据值, $k=1,2,3\dots n$, $j=1,2,3\dots 9$. 则可得校正值 β'_k 为

$$\beta'_k = c - \sum_{j=1}^9 S'_{kj} / 9 \quad (20)$$

样液所产生的抑菌圈直径校正值 \overline{R}_k 为:

$$\overline{R}_k = \sum_{j=1}^9 R_{kj} / 9 + \beta'_k \quad (21)$$

使用 \overline{R}_k 从标准曲线上查出符合该被检样液经校准后的抑菌圈直径数值的含量, 乘以样本样液的稀释倍数, 得出结果以 $\mu\text{g/g}$ 保存到检测报告. 表 1 为实验中检测得到的标准曲线的参数列表. 可以计算得到 H、L 并在双周半对数坐标系中绘制标准曲线, 得到输出的标准曲线图如图 7 所示.

表 1 标准曲线参数值

样本图像	a	b	c	d	e
浓度($\mu\text{g/mL}$)	0.050	0.100	0.200	0.400	0.800
半径(校正后 mm)	13.1	15.0	17.0	18.9	20.9
对数值	-2.9957	-2.3026	-1.6094	-0.9163	-0.2231

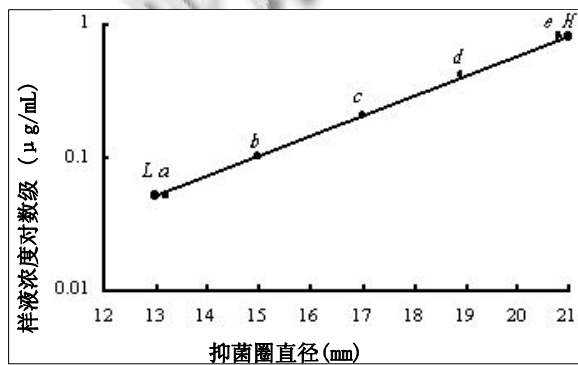


图 7 标准曲线

最后使用稀释的样液作为样本进行检测, 根据公式计算可以得到残留量检测值. 表 2 列出了部分样本检测数据及结果误差.

表 2 样本检测值

测试样液浓度 ($\mu\text{g/mL}$)	抑菌圈直径 (mm, 校正后)	检测查表值 ($\mu\text{g/mL}$)	误差 (%)
0.080	12.4	0.0794	0.79
0.150	14.2	0.1505	0.33
0.200	15.0	0.2000	0.00
0.250	15.6	0.2475	0.98
0.500	17.6	0.5040	0.79

4 结论

本研究建立的海产品抗生素残留检验方法与系统, 采用计算机视觉与先进的图像处理技术, 实验与计算方法符合国家标准和规定流程, 可以取代传统的人工操作方式, 大大提高海产品抗生素残留检验速度和精度.

参考文献

- 1 中华人民共和国卫生部.GB/T 13110_91 蜂蜜中四环素族抗生素残留量的测定方法.北京:中国标准出版社,1991.
- 2 Rafael C. Gonzalez, Woods RE, Eddins SL, et al.数字图像处理 第 2 版.北京:电子工业出版社,2007.276-313.
- 3 Chen Zhi, Wang GZ, Feng S, et al. Application of homeostasis filtering in image processing of particles field holography. Journal of Photons. 2004,33(2):167-170.
- 4 Hamm M, Bharath AA. Circle size by fusion of pyramidal transform data. Intelligent Sensor Processing. Intelligent Sensor Processing. 2001,(2):12/1-12/6.
- 5 孙延奎.小波分析及其应用.北京:机械工业出版社,2005. 31-58.
- 6 刘珂,周富强,张广军.半径约束最小二乘圆拟合方法及其误差分析.光电子·激光,2006,17(5):604-607.
- 7 Schmeelk J. Wavelet transforms and edge detectors on digital images. Mathematical and Computer Modelling, 2005,41 (13):146.