

基于计算机视觉的蜂窝陶瓷在线检测系统研究

李颖^{1,2}, 黄守道², 孙洪林¹, 李刚成¹

(1. 湖南信息职业技术学院, 长沙 410200; 2. 湖南大学 电气与信息工程学院, 长沙 410082)

摘要: 研发了一种基于计算机视觉的蜂窝陶瓷智能在线检测系统; 设计了系统的体系结构, 4台高速摄像机在线获取蜂窝陶瓷图像, 研究了改进型加权中值滤波处理, 论述了基于 Fisher 评价函数的图像阈值分割算法; 最后进行亚像素测量, 判断产品尺寸是否在允许范围内, 实验验证了系统的有效性和检测算法的可行性, 可以很好地代替人工检测。

关键词: 计算机视觉; 蜂窝陶瓷; Fisher 评价函数; 亚像素测量

Research and Development of Honeycomb Ceramics' On-line Automatic Inspection System Based on Computer Vision

Li Ying^{1,2}, Huang Shoudao², Sun Honglin¹, Li Gangcheng¹

(1. Hunan College of Information, Changsha 410082, China;

2. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: This paper introduce a design of honeycomb ceramics' on-line automatic checkout system based on machine vision. The checkout system acquires images of honeycomb ceramics through high-speed video camera. Firstly, the images are processed by using improved weighted median filtering. Then, the images run into threshold segmentation on the basis of Fisher criterion function method. Finally, sub-pixel measurement is applied so as to judge whether the product dimension is within the allowed scope. The experiment proves the effectiveness of the system and feasibility of detecting algorithm.

Keywords: computer vision; honeycomb ceramics; fisher criterion function; subpixel measurement

0 引言

蜂窝陶瓷是近 30 年来开发的一种结构似蜂窝形状的新型陶瓷产品, 蜂窝陶瓷由无数相等的孔组成各种形状, 由于多孔薄壁的特点, 大大增加了载体的几何表面积和改善了抗热冲击性能, 极大地提高燃烧效率, 降低氧化损和 NO_x 气体的生成, 节约能源, 对保护环境有很大的益处, 具有高强度、耐高温、耐腐蚀及耐磨等特性。因此, 蜂窝陶瓷由最早使用在小型汽车尾气净化到今天广泛应用在钢铁、机械、建材、石化、有色金属冶炼等多个行业中, 而且应用越来越广泛^[1-2]。蜂窝陶瓷实物和其过滤示意图如图 1 所示。

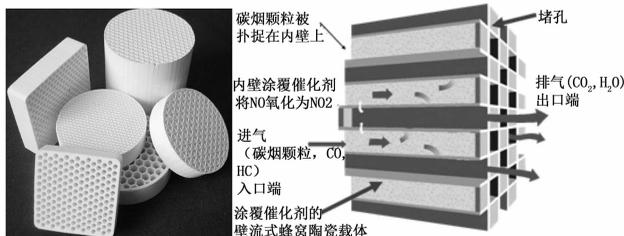


图 1 蜂窝陶瓷实物图和其过滤效果示意图

蜂窝陶瓷质量检测是其生产线上一个必不可少的环节。由

收稿日期: 2013-12-26; 修回日期: 2014-03-16。

基金项目: 湖南省科技厅资助项目(2012FJ3093)。

作者简介: 李颖(1972-), 女, 湖南衡阳人, 硕士, 副教授, 主要从事机器视觉和自动控制方向的研究。

于可能存在陶瓷变形和破损等情况, 因此需要对其进行精准测量。目前主要采用人工抽检法, 人工检测效率低、速度慢、精度较低, 并且人工主观因素对产品质量影响很大, 因此极大地影响了检测效果。基于机器视觉的蜂窝陶瓷自动在线测量系统集机械、自动控制、计算机技术、机器视觉、光学成像和图像处理等多学科技术于一体, 系统能自动对蜂窝陶瓷的各个面进行实时测量和检测, 判断各类型蜂窝陶瓷是否满足尺寸精度要求, 并且速度快、精度高, 有着极为广阔的应用前景。

1 系统结构设计

系统示意图如图 2 所示。检测机柜内有四台相机, 其中三台相机检测侧面, 一台相机检测顶面, 后端的剔除器把不合格品分离出生产线。

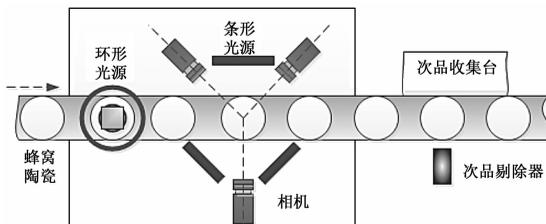


图 2 系统结构示意图

待检测蜂窝陶瓷从传送带的左侧进入检测机柜, 检测机柜内设侧壁检测工位和顶面检测工位, 蜂窝陶瓷经过检测机柜时触发传感器控制摄像机拍照, 并把图像传输到工控机中, 图像处理算法对蜂窝陶瓷进行处理和判断, 若为次品, 则被次品剔除装置剔除出生产线。

2 蜂窝陶瓷图像预处理

图像预处理的主要目的是滤除图像中的各类噪声，提高图像的信噪比。蜂窝陶瓷图像的大部分噪声都是随机的，降噪的方法也比较多，系统根据自适应滤波算法原理，提出了一种针对测量特定要求的改进型加权中值滤波算法对图像进行预处理，以保证在滤除成像噪声的同时保留图像的清晰轮廓^[3]。

设图像为 $f(i, j)$ ，采用一个长方形窗口滤波输出，可表示为^[4]：

$$g_z(i, j) = \underset{\Lambda}{\text{median}} \left[f \left(i + x - \frac{m+1}{2}, j + y - \frac{n+1}{2} \right), (x, y \in A) \right] \quad (1)$$

式中， $\underset{\Lambda}{\text{median}}$ 为在 Λ 窗口下取中间值， $g_z(i, j)$ 为滤波输出结果， m 和 n 分别为滤波窗口的长宽值。

进行自适应平滑滤波处理，过程为

$$f_L(i, j) = \sum_{m, n=-P}^P \omega_{i, j}(m, n) f(i + m, j + n) \quad (2)$$

其中： i, j 为图像的第 i 行和第 j 列， P 确定滤波区域大小，即在窗口 $(2P + 1)(2P + 1)$ 内滤波， $\omega_{i, j}(m, n)$ 为针对图像所设计的加权系数。

对灰度值差异较大的点取较小的权重，而对差异较小的点取较大的权重^[5]，

$$\omega_{i, j}(m, n) = \Phi(|f(i, j) - f(i + m, j + n)|) \quad (3)$$

其中： Φ 是单调减函数，采用指数函数来构造

$$\Phi(x) = \exp \left\{ -0.347 \left(\frac{x}{D} \right)^n \right\} \quad (4)$$

当 $n=2$ 时，指数函数可以简化为高斯函数，即

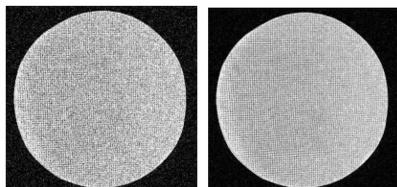
$$\Phi(x) = \exp \left(-\frac{x^2}{\sigma^2} \right) \quad (5)$$

本文采用高斯函数来计算加权系数，即

$$\omega_{i, j}(m, n) = \exp \left\{ -\frac{|f(i, j) - f(i + m, j + n)|^2}{\sigma^2} \right\} \quad (6)$$

其中： σ 为调节指数衰减速度。

在计算过程中，由于针对测量的滤波特定要求，对权重 ω 作归一化处理，使其在滤除杂质并凸显边缘的同时，平滑后的 $f(i, j)$ 不会超出图像的灰度值边界。同时，根据图像检测的需要，3 次迭代上述处理过程，获得了更好的抑噪效果，滤波效果如图 3 所示。



(a) 添加杂点的图像 (b) 滤波后图像

图 3 改进型加权中值滤波算法去噪效果图

3 图像分割与测量

3.1 图像分割

图像分割是指把图像分成若干个特定的、具有独特性质的

区域，并把这些感兴趣区域提出来的过程。蜂窝陶瓷视觉检测系统需要对陶瓷进行测量，一个关键点既是把蜂窝陶瓷区域和背景进行分割。

Fisher 评价函数常用来做图像处理中的特征选择，利用其选择最佳投影方向，图像分割阈值选取在图像 Fisher 评价函数最大值处。假设 n 维特征 x 在某一条直线上投影，即研究使 n 维特征从 n 维减少到一维的情况。对于两个类别 ω_1 和 ω_2 ，假定各类的特征是二维分布，设 A 表示 X 属于 ω_1 的分布， B 表示 X 属于 ω_2 的分布。属于 ω_1 类的特征向量 X 的平均值可用式 (7) 表示为

$$\mu_1 = \frac{1}{n_1} \sum_{X \in \omega_1} X \quad (7)$$

其中： n_i 表示属于 ω_1 类 X 的个数，所以用式 (7) 变换 X ，得到 Y 的平均值 m_1 和 Y 类别内的方差 δ_1^2 为

$$m_1 = \frac{1}{n_1} \sum_{X \in \omega_1} Y^T X = Y^T \mu_1 \quad \text{和} \quad \delta_1^2 = \frac{1}{n_1} \sum_{X \in \omega_1} (y - m_1)^2 \quad (8)$$

同理可分别得到 ω_2 特征对应的 μ_2, m_2 和 δ_2 。

从上述分析可知，为了能对 ω_1 和 ω_2 进行有效地区分，两类的特征应该分得越开越好，因此必须要用一个评价函数来衡量两个类别间的分离程度，Fisher 评价函数 $J(Y)$ 就是基于这个思想提出的，它可以对两个类别间的分离度进行定量描述，其定义为

$$J(Y) = \frac{|m_1 - m_2|^2}{\delta_1^2 + \delta_2^2} \quad (9)$$

从式 (9) 可以看出，当两个类别平均值间距离很大，且各类方差很小时， $J(Y)$ 取最大值。同时，还可求得 $J(Y)$ 取最大值时所对应的最佳投影直线方向^[7]。因此，把 $J(Y)$ 作为图像阈值分割的准则，选择一个最佳阈值分割点。

设图像某像素点 $P(m, n)$ 的灰度值为 $f(m, n) \in [0, L - 1]$ ，选择某阈值 S 将这幅图像分成目标和背景两个部分，目标和背景的概率分别为

$$\omega_1(S) = \sum_{i=0}^S P_i \quad \text{和} \quad \omega_2(S) = \sum_{i=S+1}^{L-1} P_i \quad (10)$$

其中： $\omega_1(S)$ 为目标概率， $\omega_2(S)$ 为背景概率， P_i 表示灰度值的概率， $P_i = \frac{f_i}{N}$ ， f_i 为灰度值为 i 的像素点， N 为图像的总像素点数。

其均值 $\mu_1(S)$ 和 $\mu_2(S)$ 分别为

$$\mu_1(S) = \frac{\sum_{i=0}^S i P_i}{\omega_1(S)} \quad \text{和} \quad \mu_2(S) = \frac{\sum_{i=S+1}^{L-1} i P_i}{\omega_2(S)} \quad (11)$$

目标和背景的类内方差分别为

$$\delta_1^2(S) = \frac{\sum_{i=0}^S (i - \mu_1(S))^2 P_i}{\omega_1(S)} \quad \text{和} \quad \delta_2^2(S) = \frac{\sum_{i=S+1}^{L-1} (i - \mu_2(S))^2 P_i}{\omega_2(S)} \quad (12)$$

在进行图像分割时，采用基于 Fisher 评价函数单阈值图像分割的评价准则为

$$J(S) = \frac{|\omega_1(S)\mu_1(S) - \omega_2(S)\mu_2(S)|^2}{\omega_1(S)\delta_1^2(S) + \omega_2(S)\delta_2^2(S)} \quad (13)$$

当 $J(S)$ 取得最大值时对应的阈值 S^* 即为分割的最佳阈值。此时，目标和背景分割得到一个最佳效果，此时阈值选择

方法为

$$S^* = \max\{J(s)\} \quad (14)$$

得到最优的图像分割阈值后, 对获取的蜂窝陶瓷图像进行阈值分割, 将灰度图像转换为二值图像。

3.2 蜂窝陶瓷图像测量

在蜂窝陶瓷测量过程中, 虽然摄像机分辨率较高, 但由于 CCD 相机的像素所代表的测量实际值精度有限, 从实际可知, 本系统对蜂窝陶瓷成像一个像素代表的尺寸为 $50 \mu\text{m}$, 为了能达到更高的要求, 在蜂窝陶瓷测量中需要达到亚像素精度。目前亚像素测量方法有很多, 如重心法、多项式插值法及空间矩法等, 在使用场合、抗噪声性能及精度方面有不同特点, 系统采用精度较高并对噪声不敏感的多项式插值法^[8]。

按照多项式插值理论, 有

$$f(x) = \sum_{k=0}^N \frac{(x-x_0)\cdots(x-x_{k-1})(x-x_{k+1})\cdots(x-x_N)}{(x_k-x_0)\cdots(x_k-x_{k-1})(x_k-x_{k+1})\cdots(x_k-x_N)}$$

$$y_k = \sum_{k=0}^N \prod_{\substack{i=0 \\ i \neq k}}^N \frac{x-x_i}{x_k-x_i} y_k \quad (15)$$

式中, x_k 为插值点, y_k 为函数值, $f(x)$ 为插值函数。

对于用边缘检测算子确定的边缘点 (x_i, y_i) , 在梯度图像 $R_{(i,j)}$ 的 X 方向上, 取 3 点, 即 $R_{(i-1,j)}, R_{(i,j)}, R_{(i+1,j)}$, 用其梯度幅值作为函数值, 用 $(x_i-w), x_i, (x_i+w)$ 3 点作为插值点 (其中 w 为像素 X 方向的间距), 代入即为二次多项式插值

$$f(x) = \frac{(x-x_i)[x-(x_i+w)]}{[(x_i-w)-x_i][x_i-(x_i+w)]}R_{(i-1,j)} + \frac{[x-(x_i-w)][x-(x_i+w)]}{[x_i-(x_i-w)][x_i-(x_i+w)]}R_{(i,j)} + \frac{(x_i-x)[x-(x_i-w)]}{[(x_i+w)-(x_i-w)][(x_i-w)-x_i]}R_{(i+1,j)} \quad (16)$$

对插值函数进行微分, 并令 $\frac{df(x)}{dx} = 0$, 则得到亚像素边缘 X 坐标, 即

$$x = x_i + \frac{w}{2} \cdot \frac{R_{(i-1,j)} - R_{(i+1,j)}}{R_{(i-1,j)} - 2R_{(i,j)} + R_{(i+1,j)}} \quad (17)$$

按照求亚像素边缘 X 坐标方法, 可得亚像素边缘 Y 坐标。

3.3 测量结果对比

蜂窝陶瓷的视觉检测主要过程如下: 首先进行检测区域定位, 然后进行改进型加权中值滤波处理, 采用基于 Fisher 评价函数的图像阈值分割, 最后进行亚像素测量。蜂窝陶瓷的图像处理过程如图 4 所示。

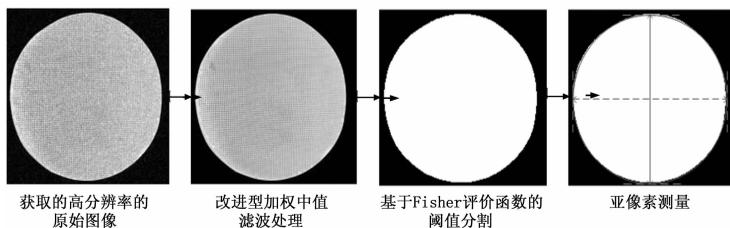


图 4 图像处理过程示意图

根据上述算法对蜂窝陶瓷进行测量, 视觉自动测量后人工千分尺测量进行对比, 对比数据如表 1 所示。

表 1 人工测量与系统自动测量对比 (ms)

蜂窝陶瓷编号	圆柱形陶瓷									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
人工检测	5.02	5.01	4.99	4.07	4.05	4.01	8.05	7.98	8.00	8.09
自动检测	5.02	5.03	4.98	4.08	4.05	4.00	8.03	7.99	8.02	8.08
蜂窝陶瓷编号	方形陶瓷									
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
人工检测	6.02	5.99	5.96	6.01	6.01	12.03	12.01	12.11	11.99	12.08
自动检测	6.02	5.97	5.99	6.00	6.00	12.02	12.00	12.13	12.01	12.07

从表中可知, 人工千分尺的测量与系统自动测量结果非常接近, 证明了系统准确率高, 能很好地代替人工检测。

4 结论

本文提出了一种基于计算机视觉的蜂窝陶瓷自动检测方法和装置。设计了系统的体系结构, 研究了针对蜂窝陶瓷测量的实用性算法。系统能自动对蜂窝陶瓷的各个面进行实时测量, 速度快、精度高, 极大地解放了人类劳动力, 提高了生产自动化水平, 改善了人类生活现状, 有着广阔的应用前景。

参考文献:

- [1] 周 娟, 姜 凡. 蜂窝陶瓷蓄热体的研究现状 [J]. 陶瓷, 2009, 4: 53-56.
- [2] 税安泽, 龚 晖, 曾令可. 高温空气燃烧技术蜂窝陶瓷传热模拟研究 [J]. 工业炉, 2009, 31 (2): 9-14.
- [3] Duan F, Wang Y N, Duan W. Super dynamic CCD camera based on multi-sensor image fusion [A]. Proceedings of the 4th World Congress on Intelligent Control and Automation [C]. Shanghai: 2002; 2211-2219.
- [4] Sezgin M, BülentSankur. Survey over image thresholding techniques and quantitative performance evaluation [J]. Journal of Electronic Imaging. 2004, 13 (1): 146-168.
- [5] Pi M H, Zhang H. Two-stage image segmentation by adaptive thresholding and gradient watershed [A]. Computer and Robot Vision Proceedings [C]. 2005: 57-64.
- [6] 陈 果. 图像阈值分割的 Fisher 准则函数法 [J]. 仪器仪表学报, 2003, 24 (6): 564-568.
- [7] 罗 钧, 黄 俊. 基于机器视觉的二维小尺寸精密测量系统 [J]. 计算机测量与控制, 2007, 15 (1): 22-24.
- [8] Kumar A, Ang G K H. Defect detection in textured materials using optimized filters [J]. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Part B, 2002, 2 (5): 553-570.
- [9] Sakurai K, Onoyama A, Fujii T, et al. Solution of pattern matching inspection problem for grainy metal layers [J]. IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing, 2002, 15 (1): 118-126.