

基于改进形态学梯度的容器密封性检测方法

李干, 吴建国, 张堃, 楚启超
(南通大学, 南通 226019)

摘要: **目的** 提出样条插值亚像素边缘检测方法, 以提高药品容器密封性检测的准确率。**方法** 采用一种改进的亚像素边缘检测方法, 首先将抖动的模糊图像进行复原, 复原后的图像经过预处理后, 再采用改进的形态学梯度的样条插值亚像素边缘检测方法, 以提高容器密封性检测的效率和准确率, 并在此基础上进行模拟实验。**结果** 该方法的检测准确率均在 95% 以上, 传统方法很难达到这样的效果。**结论** 该方法能够很好地解决传统检测方法效率低的问题, 可以满足实际的检测需求。

关键词: 边缘检测; 形态学; 亚像素; 图像复原

中图分类号: TB487 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2017)21-0109-05

The Method of Detecting the Tightness of Containers Based on Improved Morphological Gradient

LI Gan, WU Jian-guo, ZHANG Kun, CHU Qi-chao
(Nantong University, Nantong 226019, China)

ABSTRACT: The work aims to propose a method for sample pixel edge detection of spline interpolation, so as to improve the accuracy of detecting the tightness of drug container. An improved sub-pixel edge detection method was adopted. Firstly, the shaking blurred image was recovered. After the preprocessing of the recovered image, the spline interpolation sub-pixel edge detection method of the improved morphological gradient was used to improve the efficiency and accuracy to detect the container tightness. Based on that, the simulation experiment was conducted. The detection accuracy of such method was above 95%. It was very hard for the traditional method to achieve such effect. The method can solve the problem of low efficiency of traditional detection methods properly, and it can meet the actual detection needs.

KEY WORDS: edge detection; morphology; sub-pixel; image restoration

机器视觉检测技术是一种融合了多学科的综合技术, 它涉及人工智能、数字图像处理、控制技术^[1-3]。在药品包装密封性检测领域中, 传统方法有的通过机械装置的旋转扭力来判断容器的密封性, 有的采用普通像素级别的检测技术, 传统检测技术的精度已经不能够满足实际的要求, 且药品容器在包装过程中, 传送带的抖动易造成目标药品容器成像模糊, 因此需要采用亚像素级别的高精度算法来提高检测效率和准确率。文中药品容器密封性的判断通过改进形态学梯度的样条插值亚像素边缘检测方法检测出准确精细的药品容器边缘, 如果边缘越精细, 那么从

药品容器边缘上找出的最高点和瓶颈点就越准确, 两点之间的高度差范围也就越小, 从而提高药品容器密封性检测的准确率。

1 检测实验系统构建

1.1 硬件结构

文中的检测实验系统一共分为 4 个部分, 即照明、图像采集、图像处理和控制在。照明部分是整个系统的开始, 其质量将会影响到机器视觉系统的检测效果。图像采集单元采用典型的工业摄像机和日本精工

收稿日期: 2017-05-05

作者简介: 李干 (1993—), 男, 南通大学硕士生, 主攻机器视觉。

通讯作者: 吴建国 (1955—), 男, 博士, 南通大学教授, 主要研究方向为复杂生产过程系统的先进控制技术。

的摄像头。图像处理单元则采用工控计算机，主要对采集过来的图像进行处理。控制单元主要对系统的参数进行设定，获取图像处理计算的结果，以及综合控制每个部分，而这种复杂的综合控制若利用传统的工控计算机或普通的控制器来控制输入输出，其灵活性会变差，且成本不可控。为此，该单元将运算速度快、控制灵活的 ARM 处理器作为核心控制器。硬件结构见图 1。

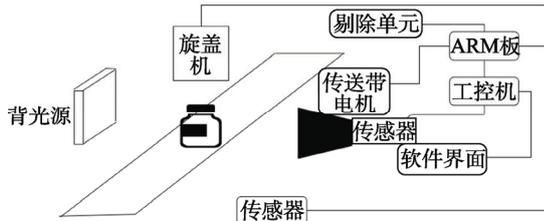


图 1 检测实验系统硬件结构

Fig.1 Hardware structure of testing experiment system

1.2 软件平台

系统软件平台的主要任务是对硬件实现控制，并将每一部分的硬件建立通信。 $\mu C/OS-II$ 是一个能够实现可剪裁、可移植、多任务、实时性强等多种功能的嵌入式系统，被广泛应用在现代控制领域中^[4-6]。检测系统采用由 Willow Garage 支持提供的开源的计算机视觉库 OpenCV，机器视觉和图像处理方面的普遍算法都能够在其库中实现。另外，由于药品容器密封性检测所需要的像素精度比较高，为了提高检测效率和准确度，文中又加入了自己的算法来融合该检测系统的视觉功能。

2 图像处理方法

2.1 图像复原

在图像采集的过程中，由于存在晃动、光源、背景噪声等影响因素，系统采集的图像变得模糊，所以必须先对图像进行去模糊复原。为了缩短计算时间，文中拟研究一个模糊图像的重建算法，将图像金字塔从下至上分为大比例的细节图像、中间部分的细节图像、小比例的细节图像和低频部分的细节图像这 4 个部分，然后对每个部分应用 R-L 方法，金字塔的顶部与中间的预处理图像尺寸分别是预处理图像的 1/4 和 1/16。较低分辨率和小尺度的图像在较大的尺度下采用 R-L 反卷积方法进行卷积，另外通过残差去卷积的方法，对在剩余尺度下的图像进行处理。最后，结合各层的输出结果，获取这个复原图像。文中的金字塔式 R-L 方法见图 2。其中 g 为模糊图像， f 为复原图像， \otimes 为卷积操作符， \hat{f} 为近似图像， L 为低通滤波器， H 为金字塔每一层的细节图像， $\sqrt{2}$ 表示金字塔

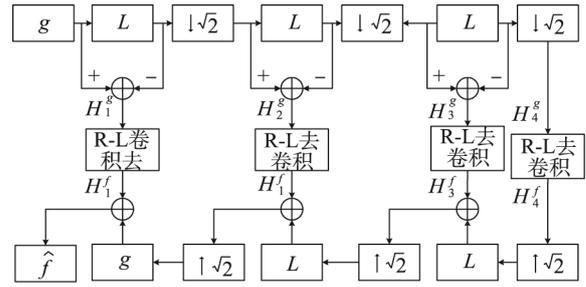


图 2 算法的 4 层金字塔结构

Fig.2 Four-layer pyramid structure of the algorithm

图像的每一层采样尺度， \downarrow 表示金字塔图像从上层到下层进行采样计算， \uparrow 表示金字塔图像从下层到上层进行反卷积。从图 2 可以看出，模糊图像通过低通滤波器分解成大比例的细节图像，金字塔结构可用公式表示。

1) 大比例的细节图像:

$$H_1^g = g - g \otimes L \tag{1}$$

2) 中间部分的细节图像:

$$H_2^g = (g \otimes L)_{\downarrow\sqrt{2}} - (g \otimes L)_{\downarrow\sqrt{2}} \otimes L \tag{2}$$

3) 小比例的细节图像:

$$H_3^g = [(g \otimes L)_{\downarrow\sqrt{2}} \otimes L]_{\downarrow\sqrt{2}} - [(g \otimes L)_{\downarrow\sqrt{2}} \otimes L]_{\downarrow\sqrt{2}} \otimes L \tag{3}$$

4) 低频部分的细节图像:

$$H_4^g = \{[(g \otimes L)_{\downarrow\sqrt{2}} \otimes L]_{\downarrow\sqrt{2}} \otimes L\}_{\downarrow\sqrt{2}} \tag{4}$$

当进行图像复原时，R-L 去卷积方法分别被应用到 H_1^f, H_2^f, H_3^f 和 H_4^f 中，可分别通过 H_1^f, H_2^f, H_3^f 和 H_4^f 来表示输出。

$$H_1^f = \text{inpain}(H_1^g) \tag{5}$$

$$H_2^f = \text{inpain}(H_2^g) \tag{6}$$

$$H_3^f = \text{inpain}(H_3^g) \tag{7}$$

$$H_4^f = \text{inpain}(H_4^g) \tag{8}$$

式中: $\text{inpain}()$ 为 R-L 算法思想，图像中锐利边缘部分通过低通滤波器和采用处理方式得到复原。复原过程可表示为:

$$\hat{f} = \left[\left(\left[\left(\left[(H_4^f)_{\uparrow\sqrt{2}} \otimes L + H_3^f \right]_{\uparrow\sqrt{2}} \right) \otimes L \right] + H_2^f \right)_{\uparrow\sqrt{2}} + H_1^f \right] \tag{9}$$

式中: \hat{f} 为近似图像。对于金字塔结构的图像，每层需要采用相应的频率段。在大比例的细节中，复原的不准确性会导致明显的人类视觉感知问题，为了避免这个问题，可减少在大比例情况下的迭代次数。与此相反，在低频部分，要使用比高频更多的迭代次数。对顶层部分则使用相对较大的迭代次数。

2.2 边缘检测

2.2.1 亚像素边缘检测

图像的很多信息集中在了图像的边缘，后期的图像处理依赖于这些信息。方向和幅度这两种属性是图

像边缘的重要信息，两种属性沿边缘方向变化平缓，而垂直于边缘方向的变化相反。针对文中药品容器密封性质量检测精度的要求，利用边缘检测方法检测出边缘，获取药品容器瓶顶和瓶颈之间的高度差作为判断条件，那么传统的边缘检测精度所产生的误差较大，不能够达到药品容器密封性检测的要求。由此，文中检测算法运用了亚像素的概念^[7-9]。当前国内外比较热门的亚像素边缘检测方法检测出的边缘抗噪声能力强，定位精度高，在实际生产应用中比较广泛^[10-13]。文中采用一种改进的检测方法，即基于改进的形态学梯度的样条插值亚像素边缘检测方法，该方法的核心是将三次样条插值法与改进的形态学梯度算子结合起来。

2.2.2 三次样条插值

目前，图像处理领域中已经有很多不同的插值算法，最邻近插值法和双线性插值法的计算过程较复杂，耗时较长，因此文中采用改进的三次样条函数对图像粗级边缘进行插值处理，改进的三次样条插值函数定义为以下内容。如果函数 $S(x)$ 达到以下 3 个条件： $S(x)$ 在每个区间 $[x_{i-1}, x_i]$ ($i=1, 2 \dots n$) 上是一次和二次的多项式；若 $S(x)$, $S'(x)$, $S''(x)$ 在 $[a, b]$ 上都是连续的；满足上述 2 个条件后，如满足 $S(x_i)=z_i$ ($i=1, 2 \dots n$)，则称 $S(x)$ 为函数 $f(x)$ 关于节点 $x_0, x_1 \dots x_n$ 的三次样条插值函数。

若 $S(x_i)=m_i$ ($i=0, 1 \dots n$)，在每个小区间 $[x_i, x_{i+1}]$ 内，利用三次样条插值公式可得：

$$S(x) = a_i(x)z_i + a_{i+1}(x)z_{i+1} + R_i(x)m_i + R_{i+1}(x)m_{i+1} \quad (10)$$

式中： $a(x)$ 和 $R(x)$ 为插值基函数； z 和 m 为样条插值节点。通过式 (10) 可知，只要求出 m_i ，即可得出 $S(x)$ 。

文中所使用的改进的三次样条插值函数的表达式为：

$$S(w) = \begin{cases} 1-2|w|^2+|w|^3 & |w| < 1 \\ -8|w|+5|w|^2+|w|^3 & 1 \leq |w| \leq 2 \\ 0 & |w| \geq 2 \end{cases} \quad (11)$$

式中： w 为样条节点。

2.2.3 改进的亚像素边缘检测方法

该方法首先将被检测目标图像进行像素级粗级定位，采用改进的形态学梯度算子的结构元素，分别为十字形和交叉型，然后通过形态学梯度算子对采集到的药品容器图像进行处理，对药品容器图像边缘进行粗级定位。接着对粗级的药品容器图像采用三次样条插值法进行插值运算，进行亚像素精定位。最后，利用形态学算子进行优化，从而高效地检测出目标图像边缘^[14]。改进的算法流程见图 3。

为了验证该方法的检测效果，文中将传统的几种方法与该方法进行对比，效果见图 4。

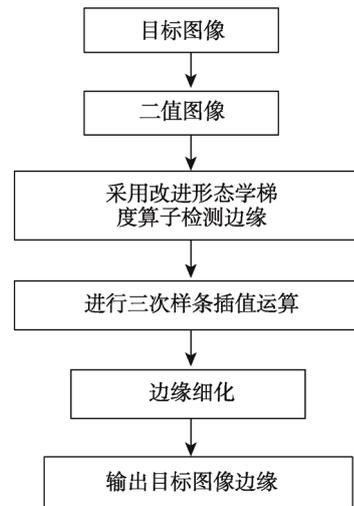


图 3 边缘检测实现流程

Fig.3 The implementation process of the edge detection

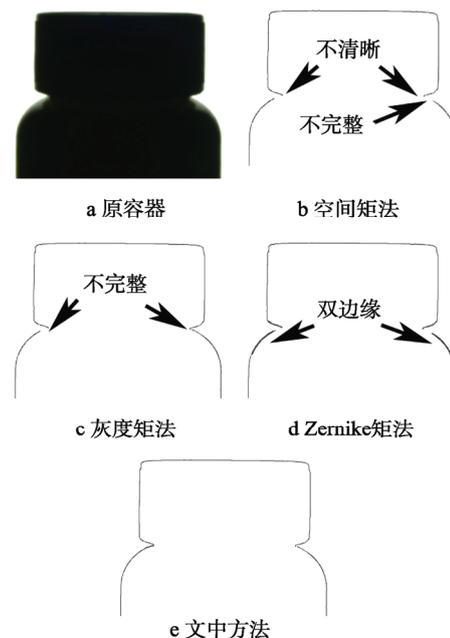


图 4 边缘检测方法比较

Fig.4 Comparison of edge detection methods

2.3 密封性检测

密封性检测的主要思想是根据边缘检测方法检测出的精细边缘，从中提取到药品容器的最高点和容器瓶颈的角点，利用这两点的距离差，也就是高度差来判别药品容器密封性质量。检测出来的边缘精细度将会影响最高点和瓶颈的角点的选取。另外，该环节的难点在于如何取到药品容器瓶颈的角点，角点的精确提取也将会影响判别药品容器密封性高度差的范围^[15]。针对文中所检测目标具有的特征，采用在 CSS 的基础上进行改进的角点检测方法。

首先引用文献[14]对曲率的定义，将曲线的曲率

定义为:

$$K(u, \sigma) = \frac{X_u(u, \sigma)Y_{uu}(u, \sigma) - X_{uu}(u, \sigma)Y_u(u, \sigma)}{[X_u(u, \sigma)^2 + Y_u(u, \sigma)^2]^{3/2}} \quad (12)$$

式中:

$$\begin{cases} X_u(u, \sigma) = \frac{\partial}{\partial u}[x(u, \sigma) \otimes g(u, \sigma)] = x(u, \sigma) \otimes g_u(u, \sigma) \\ X_{uu}(u, \sigma) = \frac{\partial}{\partial u}[x(u, \sigma) \otimes g_u(u, \sigma)] = x(u, \sigma) \otimes g_{uu}(u, \sigma), \\ Y_u(u, \sigma) = \frac{\partial}{\partial u}[y(u, \sigma) \otimes g(u, \sigma)] = y(u, \sigma) \otimes g_u(u, \sigma) \\ Y_{uu}(u, \sigma) = \frac{\partial}{\partial u}[y(u, \sigma) \otimes g_u(u, \sigma)] = y(u, \sigma) \otimes g_{uu}(u, \sigma) \end{cases}$$

其中 $g_u(u, \sigma)$, $g_{uu}(u, \sigma)$ 分别为高斯核函数

$$g(u, \sigma) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{u^2}{2\sigma^2}\right)$$

关于 u 的一阶导数和二阶导数。

角点是某一局部曲率值最大的点, 改进的 CSS 角点检测算法可以找出这些局部曲率值最大点的具体位置。实现过程为: 提取药品容器图像边缘的方法采用形态学边缘检测; 采用三次样条插值算法对图像不连续的边缘进行填充; 候选角点的判定则是通过选择局部绝对曲率最大且大于预先设定的阈值的方法。

提取药品容器的最高点的算法相对简单, 基本计算步骤为以下 3 步。

1) 预处理后的图像用数组 $a(x, y)$ 表示, 图像长用 l_a 表示, 宽用 b_a 表示。

2) 初始化, 设定起始点和终点值为 $\begin{cases} x_{\max} = 1 \\ y_{\max} = 1 \end{cases}$,

$$\begin{cases} x_{\min} = b_a \\ y_{\min} = l_a \end{cases}$$

3) 对图像边缘进行扫描, 并开始赋值操作。对整幅图像从左到右, 从下到上进行扫描。如果 $a(x, y)=1$, 就将坐标 x 与 x_{\max} 的大小进行比较, 把较大的值赋给 x_{\max} ; 比较坐标 x 与 x_{\min} 的大小, 把较小的值赋给 x_{\min} 。同理, 可以进行 y_{\max} 与 y_{\min} 的赋值操作。

将最高点与药品容器瓶颈点进行运算得到高度差, 与判断药品容器密封性检测的标准进行比较, 若在标准范围内则合格, 反之则不合格, 而该标准的范围由大量实验确定。

3 分析检测结果

传统的检测方法有的采用人工抽检, 或通过机械装置的旋转扭力进行判断, 这些方法与文中的方法没有可比性, 因此为了验证文中所采用算法的精度, 实验过程中将文中方法与传统的像素级方法进行比较, 部分数据见表 1。

传统的像素级方法检测出的边缘是粗级的, 确定

表 1 检测方法的对比
Tab.1 Comparison of detection methods %

拧紧程度	准确率	
	传统的像素级检测方法	文中改进的检测方法
1/16	8.39	95.48
2/16	10.52	96.52
3/16	13.34	97.85
4/16	21.56	97.71
5/16	52.41	98.92

的药品容器顶部和瓶颈也不准确, 2 点间的高度差范围也会随之扩大, 检测的准确率大大降低。文中方法确定的边缘是精细的, 2 点的确定也会变得准确, 从而缩小高度差标准范围来提高检测的准确率。表 1 将容器瓶盖的圆周分为 16 等分, 1/16 代表将处于旋紧状态的瓶盖向逆时针方向旋转 1/16 个圆, 2/16 则表示逆时针方向旋转 2/16 个圆, 以此类推。从数据可以看出, 传统的像素级别的检测准确率在 1/16~5/16 时是很低的, 而采用文中方法后, 准确率达到 95% 及以上。

4 结语

针对药品包装行业的容器密封性检测精度所存在的问题, 结合生产实际, 设计了适合药品包装行业的容器密封性检测方法。实验结果表明, 该检测方法大大降低了传统像素级检测方法所带来的精度误差, 且算法的改善在一定程度上缩短了检测时间。从实验数据来看, 药品容器越接近密封状态, 该检测方法的准确率会有所降低, 因此后期还需在减小检测误差方面进行优化, 进一步提高药品容器密封性检测系统的扩展性和稳定性, 使其能得到更广泛的应用。

参考文献:

[1] 孙波. 数字图像角点检测算法的研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2013.
SUN Bo. Research on Digital Image Corner Detection Algorithm[D]. Hefei: Hefei Polytechnic University, 2013.

[2] 郭克友, 廉丽冰, 李娜, 等. 基于 OpenCV 的啤酒瓶口缺陷检测系统研究[J]. 制造业自动化, 2014(15): 61—63.
GUO Ke-you, LIAN Li-bing, LI Na, et al. Research on Beer Bottle Defect Detection System Based on OpenCV[J]. Manufacturing Automation, 2014(15): 61—63.

[3] 周显恩, 王耀南, 朱青, 等. 基于机器视觉的瓶口缺陷检测方法研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2016, 30(5): 702—713.
ZHOU Xian-en, WANG Yao-nan, ZHU Qing, et al.

- Research on Detection Method of Bottle Neck Defects Based on Machine Vision[J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2016, 30(5): 702—713.
- [4] 王舒憬, 陈凯. 基于图像处理的智能电表显示缺陷自动检测系统设计[J]. *电测与仪表*, 2016, 53(4): 63—68.
WANG Shu-jing, CHEN Kai. Design of Automatic Detection System Based on Image Processing for Intelligent Meter[J]. *Electrical Measurement and Instrumentation*, 2016, 53(4): 63—68.
- [5] 何修远. 基于机器视觉的 PET 瓶盖缺陷在线检测技术研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2015.
HE Xiu-yuan. Research on Online Detection Technology of PET Bottle Cap Defects Based on Machine Vision[D]. Guangzhou: Guangdong Institute of Technology, 2015.
- [6] 张小洪, 李博. 一种新的 Harris 多尺度角点检测[J]. *电子与信息学报*, 2007, 29(7): 1735—1738.
ZHANG Xiao-hong, LI Bo. A New Harris Multi Scale Corner Detection[J]. *Journal of Electronics and Information*, 2007, 29(7): 1735—1738.
- [7] 师文, 朱学芳, 朱光, 等. 基于形态学的 MRI 图像自适应边缘检测算法[J]. *仪器仪表学报*, 2013, 34(2): 408—414.
SHI Wen, ZHU Xue-fang, ZHU Guang, et al. Adaptive Edge Detection Algorithm for MRI Images Based on Morphology[J]. *Journal of Instrumentation*, 2013, 34(2): 408—414.
- [8] 孙智鹏, 邵仙鹤, 王翥, 等. 改进的自适应 Canny 边缘检测算法[J]. *电测与仪表*, 2016, 53(6): 17—21.
SUN Zhi-peng, SHAO Xian-he, WANG Zhu, et al. Improved Adaptive Canny Edge Detection Algorithm[J]. *Electrical Measurement and Instrumentation*, 2016, 53(6): 17—21.
- [9] 李知菲, 陈源. 基于联合双边滤波器的 Kinect 深度图像滤波算法[J]. *计算机应用*, 2014, 34(8): 2231—2234.
LI Zhi-fei, CHEN Yuan. Kinect Depth Image Filtering Algorithm Based on Joint Bilateral Filter[J]. *Computer Application*, 2014, 34(8): 2231—2234.
- [10] 胡林合. 机器视觉缺陷检测系统若干问题的研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2010.
HU Lin-he. Research on Some Problems of Machine Vision Defect Detection System[D]. Hefei: Hefei Polytechnic University, 2010.
- [11] 王志强. 基于 ARM 的表面深度检测系统的研究[D]. 杭州: 中国计量学院, 2014.
WANG Zhi-qiang. Research on Surface Depth Detection System Based on ARM[D]. Hangzhou: China Jiliang University, 2014.
- [12] 王一冰. 基于机器视觉的玻璃瓶缺陷检测与抓取系统研究[D]. 长春: 长春工业大学, 2016.
WANG Yi-bing. Research on Glass Bottle Detection and Grab System Based on Machine Vision[D]. Changchun: Changchun University of Technology, 2016.
- [13] PABLO A C, SERGIO N T, WANGER E R, et al. A Machine Vision System for Automatic Detection of Parasites *Edotea Magellanica* in Shell-off Cooked Clam *Mulinia Edulis*[J]. *Journal of Food Engineering*, 2016, 181: 84—91.
- [14] LU Jun, ZHANG Hong-tao, WEI De-yun, et al. A Method for Determining Surface Free Energy of Bamboo Fiber Materials by Applying Fowkes Theory and Using Computer Aided Machine Vision Based Measurement Technique[J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University(Science)*, 2012, 17(5): 593—597.
- [15] MICHAL S, BARTOSZ P, MARCIN M, et al. Machine Vision Micro Milling Tool Wear Inspection by Image Reconstruction and Light Reflectance[J]. *Precision Engineering*, 2016, 44: 236—244.