

doi:10.3969/j.issn.2095-0411.2020.04.006

基于改进的 SIFT 算法的阀体气密性检测方法

段锁林,赵 鹏,王春玲,刘毛毛,刘 福

(常州大学 机械工程学院,江苏 常州 213164)

摘要:为解决目前阀体气密性检测存在效率低、人为因素影响大等问题,提出一种基于改进的 SIFT 算法的阀体气密性检测方法。首先采用差影算法对现场采集到的图像进行预处理;然后基于 SIFT 算法,结合改进的 SUSAN 算子及仿射变换对图像进行匹配拼接;最后循环遍历形状元素得到气泡的真实参数,从而判断阀体是否合格。实验表明,该方法提高了气泡检测效率且检测准确率达 98%,适用于同类阀体气密性检测。

关键词:阀体气密性检测;SIFT 算法;改进的 SUSAN 算法;仿射变换;凸包算法

中图分类号:TP 39

文献标志码:A

文章编号:2095-0411(2020)04-0037-09

Valve Body Airtightness Detection Method Based on Improved SIFT Algorithm

DUAN Suolin, ZHAO Peng, WANG Chunling, LIU Maomao, LIU Fu

(School of Mechanical Engineering, Changzhou University, Changzhou 213164, China)

Abstract: In order to solve the problem of low efficiency and large influence of human factors on the airtightness testing of the valve body, a method based on improved SIFT to detect the airtightness of the valve body is proposed. First of all, the algorithm of difference shadow is used to preprocess the collected images; Then based on the SIFT algorithm, combined with improved SUSAN operator, affine transformation, the image mosaic is matched; Finally, the traversal of the shape elements is repeated to obtain the real parameters of the air bubble, so as to judge whether the valve is qualified. The experiments show that the method improves the bubble detection efficiency, and the detection accuracy reaches 98%, which is suitable for testing the airtightness of the same of valves.

Key words: air tightness detection of valve body; SIFT algorithm; improved SUSAN algorithm; affine transformation; convex hull algorithm

收稿日期:2019-12-11。

基金项目:江苏省科技支撑计划项目(社会发展)(BE2013671);阀体气密性检测设备及计算机监控系统研发(横向项目)(KYH0902042)。

作者简介:段锁林(1956—),男,陕西岐山人,博士,教授。E-mail: 2859866289@qq.com

引用本文:段锁林,赵鹏,王春玲,等. 基于改进的 SIFT 算法的阀体气密性检测方法[J]. 常州大学学报(自然科学版),2020,32(4):37-45.

阀体广泛应用于与居民生活及工业生产密切相关的行业,如燃气和石油的输送、利用和贮存等,将直接影响输送系统的安全可靠性,涉及人民财产和生命安全,因此检测阀体气密性就显得尤为重要^[1]。气密性检测是判定阀体是否合格的重要因素,国内外对气密性检测方面的研究屡见不鲜,20 世纪中期以前,国内外生产厂家采用湿式检测法^[2];1990 年,干式检漏法逐渐成熟,相应的检测装置陆续问世^[3]。常用的有干式检漏法、流量法和压力响应法。传统的气泡检测都是通过人眼识别,这种方式受人为因素影响较大,且不能长时间、高强度的精确检测。随着科技的发展,检测系统智能化和自动化成为人们追求的目标。佛山市质量计量监督检测中心罗建明等^[4]研究设计气密性检测仪校准装置,减少校准成本的同时降低人为因素造成的误差,提高校准装置的准确度;谢孟龙等^[5]也将机器视觉与水检法相结合,实现了承压零件的气密性检测。以上研究均改进了气密性检测装置,但并未实现设备全自动化检测,因此,本文提出了一种基于改进的 SIFT 算法的阀体气密性全自动化检测系统。

1 阀体气密性检测系统

阀体气密性检测控制系统如图 1 所示,主要由触摸屏、计算机、图像采集模块、条形码获取模块、PLC 等组成。通过工业相机对检测过程中气泡产生情况进行实时拍摄,并把图像信息传入计算机;基于 MATLAB 对图像进行处理分析,判断是否有气泡产生,并把结果转换成数字信号;通过 OPC (Object Linking and Embedding for Process Control,工业接口标准)技术,实时传入 PLC 控制器,最终显示在触摸屏上。

阀体气密性检测的控制系统工作流程如图 2 所示。通过对采集到的图像进行处理分析得出气泡参数,根据国家标准《阀门的检测和试验》规定的误差范围,判断待测阀体是否合格。

2 气泡图像处理流程

以阀体检测过程中的气泡为研究对象,通过左右两台工业相机拍摄水面的气泡情况,并把图像信息传入计算机,利用机器视觉技术对气泡图像进行识别、处理和分析。通过计算气泡的大小、数量,判断阀体是否合格。为了减小工业相机在拍摄过程中诸多因素的影响,如机械元件的遮挡、光照变化、图像中的干扰信号等,基于 MATLAB 平台编程实现气泡图像检测。首先通过预处理以改善图像的视觉效果,采用差影算法去除图像本身存在的干扰信号,增强对目标图像有用信息的提取,易于对图像进行后期处理和分析;然后,通过图像拼接技术对左右工业相机拍摄的图像进行拼接,得到一幅图像。其中,图像拼接技术基于 SIFT 算法^[6-8]提取角点,结合改进的 SUSAN 算子对图像进行匹配拼接,以解决机械元件遮挡问题;进而,根据局部自适应阈值的方法区对待均匀和非均匀区域,以优化图像处理结果;最后,对图像进行膨胀、填充以及腐蚀处理,并循环遍历形状元素得出气泡的实际参数,以此判断阀体是否合格。上述的图像处理为后期获取气泡参数奠定了基础。气泡图像处理流程如图 3 所示。

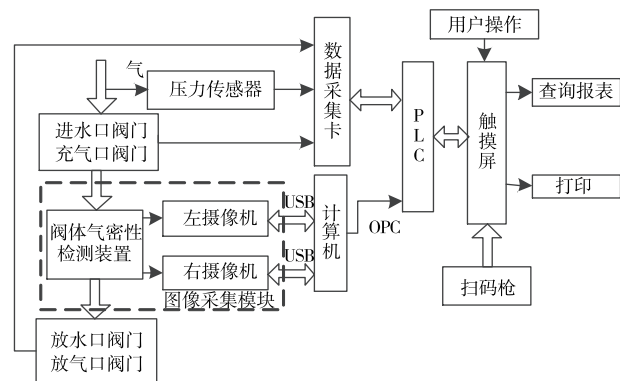


图 1 阀体气密性检测系统组成

Fig.1 Detection system of valve air tightness

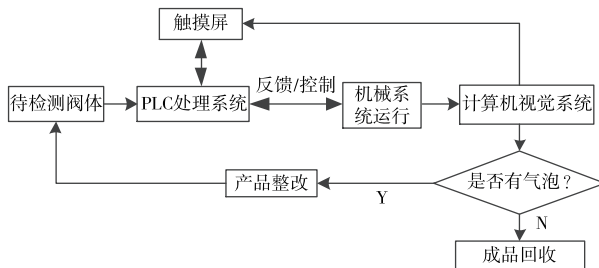


图 2 检测系统工作流程图

Fig.2 Work flow chart of test system

2.1 图像预处理

本文使用的图像预处理方法,包括图像灰度化、中值滤波去噪、差影算法等。其中,差影法^[9]是把同一景物在不同时间段或不同波段的图像相减来检测其运动和其他变化的算法,却难以保证相减图像的对应像素点位于空间同一目标点上,为此,进行进一步的改进。设输入图像为 $A(x, y)$ 和 $B(x, y)$, 输出图像为 $C(x, y)$, 则图像相减的运算表达式为

$$C(x, y) = A(x, y) - B(x, y) \quad (1)$$

假定产生的图像位移为 Δx , 差影图像由式(2)得出

$$C(x, y) = A(x, y) - A(x + \Delta x, y) \quad (2)$$

如果 Δx 足够小,那么式(2)就可以近似为

$$C(x, y) = \frac{\partial}{\partial x} A(x, y) \Delta x \quad (3)$$

$\frac{\partial}{\partial x} A(x, y)$ 本身也是一幅图像,直方图表示为 $H'(D)$ (其中 D 表示灰度值)。因此,位移差图像直方图表示方式为

$$H_c(D) \approx \frac{1}{\Delta x} H'_A\left(\frac{D}{\Delta x}\right) \quad (4)$$

式中: $H_c(D)$ 为输出图像 $C(x, y)$ 的直方图; Δx 为微位移。通过公式(4),减去有些许偏移的相同图像可以获得偏导数图像,即偏导数的方向代表图像位移方向。

2.2 气泡图像拼接

SIFT 算法通常采用最近邻比率方法来进行特征点匹配,此方法方便简单且较为稳定,但匹配精度较低。本文采用基于 SIFT 算法,结合改进的 SUSAN 算子、仿射变换对左、右工业相机拍摄的气泡图像进行匹配拼接。

2.2.1 传统的 SIFT 算法

尺度不变特征转换(SIFT)^[10-12]是指图像的局部性特征,具有旋转、尺度缩放、亮度变化不变性与较强的稳定性及高速性。算法实现步骤如下:①通过高斯微分函数识别对于尺度和旋转不变的潜在兴趣点;②通过一个拟合精细的模型来确定位置和尺度;③基于图像局部的梯度方向,分配给每个关键点位置一个或多个方向;④在每个关键点周围的邻域内以及选定的尺度上测量图像局部的梯度。

2.2.2 改进的 SIFT 算法

传统的 SIFT 算法实时性较差、匹配准确率较低,因此,提出基于改进的 SUSAN 算子提取特征点和基于仿射变换的不变性的误匹配剔除算法。

1) 改进的 SUSAN 算子

SUSAN 算子以圆形模板遍历图像,圆具有旋转不变性,所以本文选取该算子对特征点进行描述。设大小为 $M \times N$ 的图像 I 中像素点 (m, n) 的灰度级为 $I(m, n)$, 其中 $m = 0, 1, 2, \dots, M-1; n = 0, 1, 2, \dots, N-1$ 。遍历图像 I (遍历图像为中间机械部件), 利用模板内的每一个像素与中心像素进行比较,比较方式见式(5)

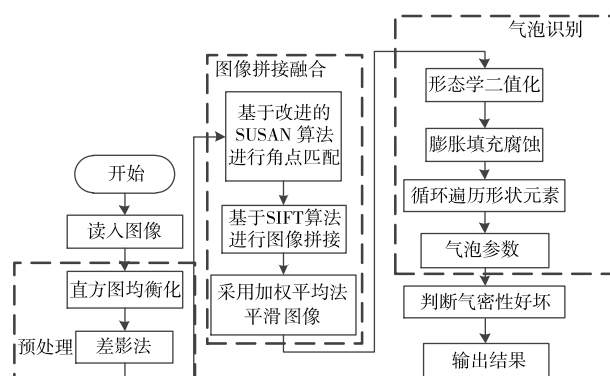


图3 气泡图像处理流程

Fig.3 Processing flow of bubble image

$$c(r, r_0) = \begin{cases} 1 & |I(r) - I(r_0)| \leq t \\ 0 & |I(r) - I(r_0)| > t \end{cases} \quad (5)$$

式中: $I(r)$ 是中心像素; $I(r_0)$ 是掩膜内的其他像素; t 是一个像素差异阈值。本文对大量不同目标区域图像进行角点检测, 最终设定参数 t 的取值为 25。通过统计 $c(r, r_0)$ 的值, 得到吸收核同值区 (USAN) 的大小, 统计方式见式 (6)

$$n(r_0) = \sum_r c(r, r_0) \quad (6)$$

式中 $n(r_0)$ 的值代表 USAN 的大小。通过计算 USAN 区域的重心以及重心和模板中心的距离, 判断特征点是否保留。如果距离较小且 USAN 区域的重心和模板中心的连线所经过的像素不属于 USAN 区域的像素, 则剔除。

通过阈值化得到初步的边缘响应为

$$R(r_0) = \begin{cases} g - n(r_0) & n(r_0) < g \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (7)$$

式中 $g = 3n_{\max}/4$ 。USAN 值与边缘的响应成正比, 则满足式 (8) 要求的点 r_0 就是图像的角点为

$$g_1 < R(r_0) < g_2 \quad (8)$$

式中 g_1, g_2 分别是 $R(r_0)$ 的下限和上限。当 $R(r_0)$ 大于 g_1 时, 由于孤立噪声点的存在, 使用 Gabor 滤波器平滑图像, 提高特征点位置和方向分辨率以及噪声稳健性^[13]; 通常孤立噪声点的 $R(r_0)$ 高于角点, 遍历图像求出各特征点的方向导数, 由上限 g_2 过滤孤立噪声点, 避免对角点检测产生干扰。

利用式 (7) 和式 (8) 提取原始图像 I 的角点, 将角点的灰度值设为 255, 其他点置为 0, 构成角点图像 S 为

$$S(m, n) = \begin{cases} 255 & I(m, n) \text{ 为角点} \\ 0 & I(m, n) \text{ 为非角点} \end{cases} \quad (9)$$

由于 SUSAN 算法^[14]简单, 具有较强的鲁棒性且不受模版尺寸影响, 因此采用改进的 SUSAN 算法对特征点进行逐一判断, 优化特征点。

2) 仿射变换

仿射变换^[15]是一种简单的变换, 包括旋转、平移、伸缩, 由图 4 完成仿射变换公式的推导。点 P 在原始坐标系下的坐标是 (X_{sp}, Y_{sp}) 。基于原点进行旋转操作, 得出图 4 中以 (X_{s0}, Y_{s0}) 为中心的虚线与屏幕水平垂直的坐标系。

基于以上论述, 通过立体几何知识确定 P 在新坐标系中 X 坐标和 Y 坐标为

$$\begin{cases} X = Y_{sp} \sin \theta_y + X_{sp} \cos \theta_x \\ Y = Y_{sp} \cos \theta_y - X_{sp} \sin \theta_x \end{cases} \quad (10)$$

整理式 (10) 得

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_x & \sin \theta_y \\ -\sin \theta_x & \cos \theta_y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_{sp} \\ Y_{sp} \end{bmatrix} \quad (11)$$

经旋转变换后, 确定 P 点在新坐标系位置与其在 X 轴和 Y 轴的偏移之和, 即可得平移变换, 为

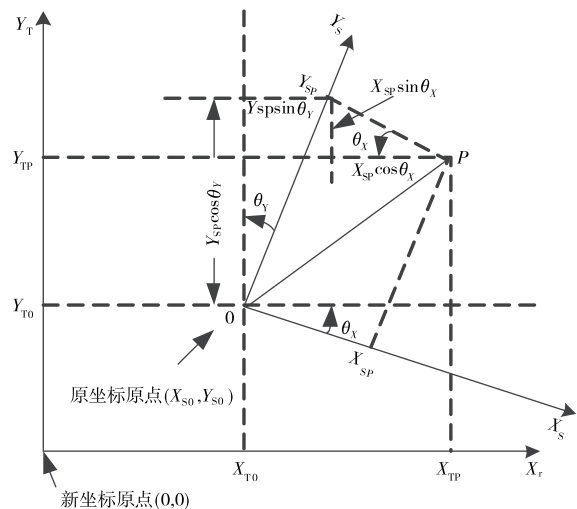


图 4 仿射变换坐标系

Fig.4 Coordinate system of affine transformation

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta_x & \sin\theta_y \\ -\sin\theta_x & \cos\theta_y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_{sp} \\ Y_{sp} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \end{bmatrix} \quad (12)$$

仿射变换的矩阵是齐次坐标形式的变换矩阵,为

$$\begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta & t_x \\ -\sin\theta & \cos\theta & t_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

通过采用仿射变换对图像进行一定程度的校正和误匹配点剔除,以便识别和配准。

2.3 阈值的选取

取3组试验图像,将光照降低90,并加入遮挡物和0.05的椒盐噪声进行试验研究,选取最佳的匹配阈值和仿射阈值以完成更好的匹配。根据经验判断,选取0.7,0.8,0.9作为匹配阈值,0.5,0.6,0.7,0.8,0.9,1作为仿射阈值,通过图3中图像拼接融合的流程进行实验研究,其结果如图5所示。

由阈值分析结果图可知,在同一个仿射变换阈值下,匹配阈值与匹配准确率成反比。当匹配阈值为0.7时,匹配准确率约为1,因此,匹配阈值取值为0.7。在同一匹配阈值下,仿射阈值与匹配准确率成正比,当仿射阈值为0.8时,匹配准确率与匹配阈值的取值无关,因此,取仿射阈值为0.8。

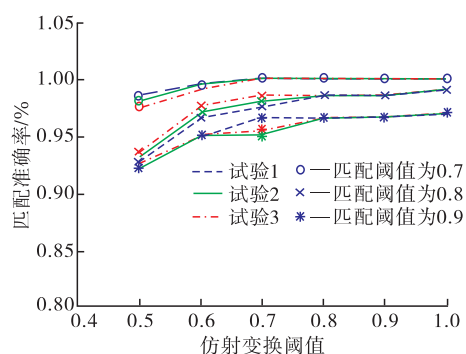


图5 阈值分析

Fig.5 Threshold analysis

3 实验结果分析

实验平台如图6所示,2个工业相机的型号相同,安装位置为向下倾斜45°。用于处理图像的计算机CPU为Intel(R)Core(TM)i5,主频为2.5 GHz,内存为8.0 GB,操作系统为Win10,MATLAB软件版本为R2014b。实验图像的分辨率均处理为2 200×1 700像素。经过多次实验验证,由表1得出该方法在保证检测准确性的同时,解决了机械遮挡、光照变化以及图像干扰信号对气泡检测的不良影响,适用于各类阀体气密性的检测。以图7所示的图像为例,图7(a)和图7(b)是同一阀体检测时左右相机的成像情况。

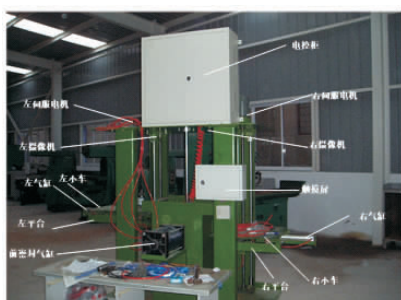
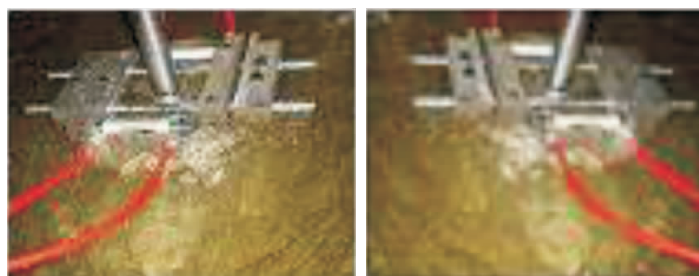


图6 实验平台

Fig.6 Experimental platform



(a) 左相机

(b) 右相机

图7 同一阀体检测时成像

Fig.7 Imaging when the same valve body is inspected

3.1 改进的 SIFT 算法的拼接实验

因拍摄的角度不同,左右图像存在差异,利用 SIFT 算法提取两幅图像的特征点,提取特征点的效果如图 8 所示,粗匹配的效果如图 9 所示。

采用改进的 SUSAN 算子对候选点进行逐一判断,若 USAN 区域的重心和模板中心的距离较小,且与模板中心的连线所经过的像素不属于 USAN 区域的像素,则剔除,反之保留。然后,由仿射变换的不变性剔除误匹配点,优化效果如图 10 所示,并在图像融合区域采用加权平均的方法达到图像平滑显示的效果,最终完成图像的拼接如图 11 所示,通过不同时刻拍摄的图片进行 100 次以上反复实验,匹配实验数据见表 2。

表 1 部分实验结果数据

Table 1 Some experimental data

组别	图像变换	匹配准确率/%	识别准确率/%	耗时/s
1	机械遮挡	98.1	98.2	0.326
	光照变化	97.7	97.8	0.345
	图像干扰	97.8	97.6	0.336
2	机械遮挡	98.2	98.3	0.324
	光照变化	97.9	97.6	0.340
	图像干扰	97.5	97.4	0.326
3	机械遮挡	98.5	98.4	0.338
	光照变化	98.3	97.8	0.342
	图像干扰	97.4	97.5	0.328

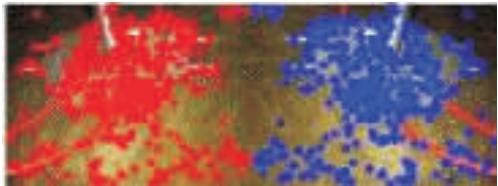


图 8 SIFT 提取图像角点

Fig.8 SIFT extracts image corners

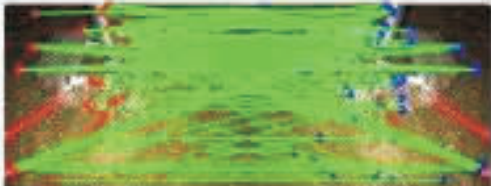


图 9 图像特征点匹配

Fig.9 Matching of image feature point

虽然 SIFT 图像匹配算法具有较好的匹配结果,但是算法本身较为复杂,运算时间较长。文献[16]通过添加约束条件进行特征点匹配,来剔除误匹配的特征点,提高了算法效率和匹配精度。本文算法在图像匹配经典算法研究的基础上,通过增加约束,利用改进的 SUSAN 算法提取特征点,并采用仿射变换消除误匹配点,提高匹配点的精度。通过表 2 统计的实验数据,可以看出虽然本文算法的耗时比文献[16]稍长,但在匹配准确率上有了很大的提高,综合考虑本文算法具有一定的优越性。

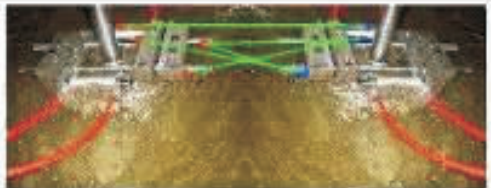


图 10 优化图像特征点图

Fig.10 Optimized of image feature points

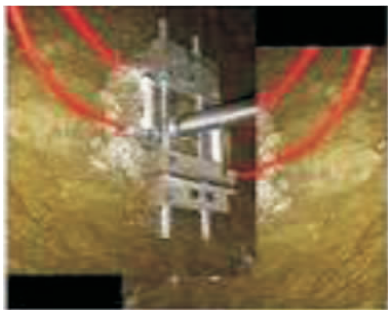


图 11 图像拼接

Fig.11 Image stitching

表 2 实验数据统计

Table 2 Experimental data statistics

算法	匹配数/对	匹配准确率/%	耗时/ms
SIFT	246	79.63	482.6
文献[16]	84	92.52	276.3
本文算法	5	97.35	278.6

3.2 气泡处理结果

针对图像光照不均匀的问题,对拼接后的图像执行局部自适应阈值,根据局部变化区分对待均匀和非均匀区域。在处理图像之前,先优化二值化结果,使图像处理结果更为精确。本文使用一个水平滑窗,从左至右逐像素滑动。对于窗口内的像素,利用方差计算局部变化。若窗口内方差大于阈值,使用 OTSU 算法计算窗口内局部阈值,并二值化该窗口内像素。反之,则将该窗口内所有像素设为白色。

以阀体检测过程中的气泡为研究对象,只需对水面气泡情况进行处理分析,因此,需剔除机械元件部分。通过对气泡重心的绘制以及对矩形的 ROI 处理,发现 ROI 提取便于后续的气泡分隔,降低图像其他部分的干扰;然后对图像进行膨胀、填充以及腐蚀处理,还原重叠部分的气泡,使二值图像边缘清晰化,并利用 `bwboundaries()` 函数获取二值图中气泡的轮廓如图 12 所示,最终得出标签矩阵。其中,每次求出的标签矩阵中的最大元素即气泡个数,由此获得气泡的半径以及对应的个数,从而根据检测标准判定阀体是否合格。本文采用凸包算法^[17-18]提取气泡的最小凸集即气泡的分布情况如图 13 所示。

为了确定文章算法的有效性,进行 4 组模拟实验,分别控制气泡直径为 1,2,4,8 mm 以上。对水面气泡进行图像采集,并选取 5 组代表性数据,分别对采集结果进行算法计算和人工计算的对比分析。计算结果如图 14 所示,从图中可以得出,当气泡直径为 1 mm 左右时,被检测到的气泡较少,算法计算检测到的气泡数量会比人工计算数量多;当气泡直径为 2 mm 左右时,算法计算结果与人工计算结果基本一致;当气泡直径为 4 mm 左右时,算法计算结果多于人工计算的气泡数量;当气泡直径为 8 mm 以上时,计算的气泡数量较多,但算法计算与人工计算的差距变大。由此得知,算法计算气泡数量不仅在时间上优于人工计数,而且在计算气泡数量上也有一定的优势,成功验证了算法的可行性。

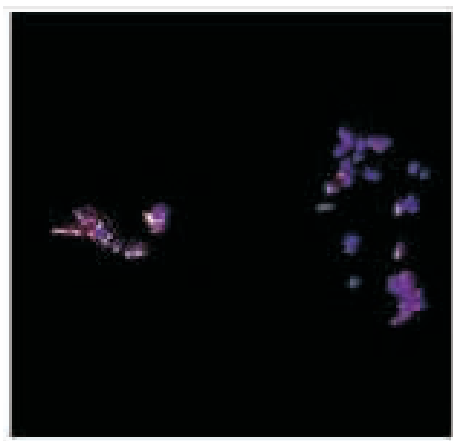


图 12 气泡重心及区域

Fig.12 Bubble center of gravity and area

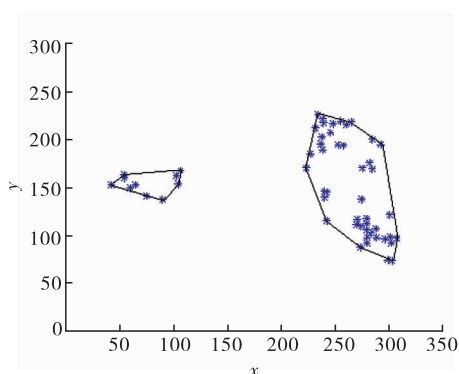


图 13 气泡分布图

Fig.13 Bubble distribution

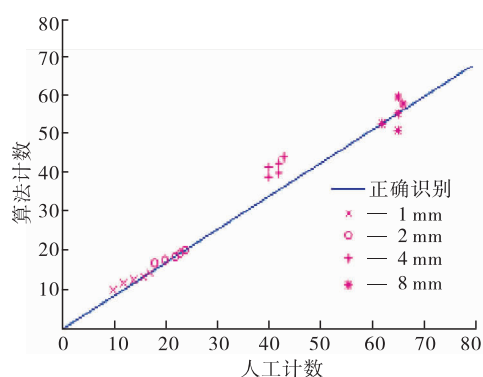


图 14 对比结果图

Fig.14 Contrast result chart

通过 100 次实验统计(其中,合格阀体和不合格的阀体各 50 次,并已标记阀体的泄漏位置),以检测出存在泄漏的阀体与检测阀体的总数的比值得出气密性检测准确率,以检测出泄漏点定位正确的次数

与总实验次数的比值得出泄漏点简单定位的准确率,气泡检测实验数据见表 3,可看出与传统 SIFT、文献[16]算法相比,本文算法的气泡分布区域定位准确率较高,气密性检测的整体效果较好。

PLC 借助 PC Access 软件构成 OPC 服务器, MATLAB 作为 OPC 的客户,通过 OPC 协议实现 MATLAB 与 PLC 数据的实时交换^[19], PLC 控制器根据指令控制阀体气密性检测装置中的各个执行机构动作,完成阀体的气密性检测。

表 3 气泡检测实验数据统计

Table 3 Experiment data statistics of bubble detection

算法	阀体气密性检	气泡分布区域	耗时/ms
	测准确率/%	定位准确率/%	
SIFT	76.32	72.56	305.6
文献[16]	85.53	83.6	199.3
本文算法	98.2	95.13	71.4

4 结 论

针对目前阀体气密性检测方法的不足,提出一种基于改进的 SIFT 算法的阀体气密性检测方法。

1)以阀体检测过程中的气泡为研究对象,基于 MATLAB 平台进行图像处理,讨论与此相关的图像预处理。

2)提出了基于改进的 SUSAN 算子、仿射变换的 SIFT 算法,对左右工业相机拍摄的气泡图像进行匹配拼接以达到图像拼接融合的效果,提高了检测精度。

3)通过矩形的 ROI 提取,循环遍历形状元素等方式得出气泡参数;通过凸包算法得出气泡的范围,从而对气泡分布区域进行定位,以粗略定位泄漏点的范围的效果。

4)基于 OPC 技术实现 MATLAB 与 PLC 实时通信,满足控制需求。

5)提出的阀体气密性检测方法在泄漏点定位方面存在一定的偏差,在后续研究中,将考虑阀体边缘的曲率以及水流对气泡的影响,逐步使泄漏点定位更为精准。

实验表明,该方法在保证检测准确性的同时,可缩短检测时间,提高气泡检测效率,解决了机械遮挡、光照变化以及图像干扰信号对气泡检测的不良影响,可检测泄漏点的范围,适用于同类阀体气密性的检测。

参考文献:

- [1]MURVAY P S, SILEA I. A survey on gas leak detection and localization techniques[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2012(25): 966-973.
- [2]WEI W. Control system design of detection device for pipe air tightness based on water test method[J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 401: 1195-1199.
- [3]HARTLEY J L, GARCIA F. Enhanced method of bubble testing[C]//Proceedings of the American Society for Non-Destructive Testing Conference, Philadelphia:[s.n.], 1980:12-129.
- [4]罗健明, 李杰, 杨信立. 基于 PLC 的气密性检测仪校准装置的研究[J]. 计测技术, 2015(s1): 94-95.
- [5]傅其凤, 谢孟龙, 崔彦平. 一种修正 HHT 阶次谱的齿轮箱非稳态信号分析方法[J]. 机械传动, 2012, 36(12): 84-87.
- [6]ZHANG J, CHEN G, JIA Z. An image stitching algorithm based on histogram matching and SIFT algorithm[J]. International Journal of Pattern Recognition & Artificial Intelligence, 2017, 31(4): 381-395.
- [7]ZHANG G, ZENG Z, ZHANG S, et al. SIFT matching with CNN evidences for particular object retrieval[J]. Neurocomputing, 2017, 238: 399-409.
- [8]CHEN Y, SHANG L. Improved SIFT image registration algorithm on characteristic statistical distributions and con-

- sistency constraint[J]. Optik-International Journal for Light and Electron Optics, 2016, 127(2): 900-911.
- [9]汪成龙,方浩群,马秋立,等.基于机器视觉的注塑机模具监控系统[J].塑料工业,2017(11):85-88.
- [10]郭艾侠,熊俊涛,肖德琴,等.融合 Harris 与 SIFT 算法的荔枝采摘点计算与立体匹配[J].农业机械学报,2015,46(12):11-17.
- [11]涂婷,陆济湘.基于分块和仿射不变性的 SIFT 图像匹配算法[J].计算机应用研究,2018(12):1-2.
- [12]冯文斌,刘宝华.改进的 SIFT 算法图像匹配研究[J].计算机工程与应用,2018,54(3):200-205,232.
- [13]朱战立,陈雨馨.利用 Gabor 方向导数相关矩阵的角点检测[J].计算机应用,2013,33(10):2902-2906.
- [14]吴一全,王凯.基于 SUSAN 算子和角点判别因子的目标边缘检测[J].中国科学院大学学报,2016,33(1):128-134.
- [15]戚海想.基于仿射变换的局部特征匹配算法[J].现代计算机(专业版),2016(5):58-62.
- [16]张勇,王志锋,马文.基于改进 SIFT 特征点匹配的图像拼接算法研究[J].微电子学与计算机,2016,32(3):60-64.
- [17]黄冬梅,杨建,郑小罗,等.基于改进凸包算法的船舶巡航预警快速监测研究[J].计算机应用研究,2018,39(11):49-51,64.
- [18]姚泽烽,程显毅,谢璐.基于 ORB 和最小凸包的感兴趣区域检测方法研究[J].计算机应用研究,2018,35(10):312-314.
- [19]陈宏希,邹益民.基于 OPC 的 Matlab 与 S7-200 PLC 实时通信在过程控制实验装置中应用[J].工业仪表与自动化装置,2015(5):55-58.

(责任编辑:李艳)

【上接第 18 页】

- [14]MONGE C, SAHA N, BOUDOU T, et al. Rigidity-patterned polyelectrolyte films to control myoblast cell adhesion and spatial organization[J]. Advanced Functional Materials, 2013, 23(27): 3432-3442.
- [15]CHEN X C, REN K F, ZHANG J H, et al. Humidity-triggered self-healing of microporous polyelectrolyte multilayer coatings for hydrophobic drug delivery[J]. Advanced Functional Materials, 2015, 25(48): 7470-7477.
- [16]SWINEHART D F. The beer-lambert law[J]. Journal of Chemical Education, 1962, 39(7): 333-335.
- [17]LAVALLE P, GERGELY C, CUISINIER F J G, et al. Comparison of the structure of polyelectrolyte multilayer films exhibiting a linear and an exponential growth regime; an in situ atomic force microscopy study[J]. Macromolecules, 2002, 35(11): 4458-4465.
- [18]ZHU Y, XUAN H, REN J, et al. Humidity responsive self-healing based on intermolecular hydrogen bonding and metal-ligand coordination[J]. RSC Advances, 2016, 6(92): 89757-89763.
- [19]HAN J, DOU Y, WEI M, et al. Erasable nanoporous antireflection coatings based on the reconstruction effect of layered double hydroxides[J]. Angewandte Chemie, 2010, 122(12): 2217-2220.
- [20]BERG M C, ZHAI L, COHEN R E, et al. Controlled drug release from porous polyelectrolyte multilayers[J]. Biomacromolecules, 2006, 7(1): 357-364.
- [21]WANG X, LIU F, ZHENG X, et al. Water-enabled self-healing of polyelectrolyte multilayer coatings[J]. Angewandte Chemie, 2011, 50(48): 11378-11381.
- [22]DAN N. Drug release through liposome pores[J]. Colloids Surface B: Biointerfaces, 2015, 126: 80-86.
- [23]CHOU S F, CARSON D, WOODROW K A. Current strategies for sustaining drug release from electrospun nanofibers[J]. Journal of Controlled Release, 2015, 220: 584-591.
- [24]HIGUCHI T. Rate of release of medicaments from ointment bases containing drugs in suspension[J]. Journal of Pharmaceutical Sciences, 1961, 50(10): 874-875.

(责任编辑:李艳,谭晓荷)