

基于机器视觉的微型摆轮质量检测系统^①



魏东亮¹, 周迪斌¹, 张家瑜¹, 马建峰²

¹(杭州师范大学 杭州国际服务工程学院, 杭州 311121)

²(杭州手表有限公司, 杭州 310015)

通讯作者: 周迪斌, E-mail: dibin1_zhou@126.com

摘要: 摆轮在精密仪器设备中经常使用, 其平整度与整个仪器的精密准确性密切相关. 传统摆轮检测以人工为主, 本文提出一种基于机器视觉的摆轮平整度检测系统, 先校正摆轮图像, 然后提取其亚像素边缘信息, 并通过投影映射精确计算边界信息. 系统支持连续采样计算, 并以摆轮边缘的动态极差作为零件的合格标准. 实验结果表明, 该方法实时性好, 准确率高, 可以满足工业检测需求.

关键词: 摆轮检测; 亚像素边缘; 直线检测

引用格式: 魏东亮, 周迪斌, 张家瑜, 马建峰. 基于机器视觉的微型摆轮质量检测系统. 计算机系统应用, 2020, 29(1): 73-79. <http://www.c-s-a.org.cn/1003-3254/7225.html>

Micro Balance Wheel Quality Inspection System Based on Machine Vision

WEI Dong-Liang¹, ZHOU Di-Bin¹, ZHANG Jia-Yu¹, MA Jian-Feng²

¹(Hangzhou Institute of Service Engineering, Hangzhou Normal University, Hangzhou 311121, China)

²(Hangzhou Watch Co. Ltd., Hangzhou 310015, China)

Abstract: Balance wheel is commonly used in precision instruments. Its flatness plays an important role in the precision and accuracy of the whole instrument. Traditionally inspection of balance wheel is done manually. This study raises a flatness inspection system for balance wheel based on machine vision. First, the image of balance wheel is calibrated. Second, its sub-pixel edge information is extracted and boundary information is accurately calculated through projection mapping. The system supports continuous sampling and calculation and takes the dynamic range of the edge of the balance wheel as acceptability criteria of parts. The result of the test shows that this method has a satisfied real-time property and high accuracy, so it can meet industrial inspection needs.

Key words: balance wheel detection; sub-pixel edges; straight line detection

在精密机械行业, 微型摆轮 (图 1) 是一种常见的部件, 在生产过程中容易出现表面不平整, 边缘处弧度不达标等缺陷. 因此, 在组装设备之前必须进行严格检测, 剔除次品. 传统的检测方法主要是人工检测, 工人通过双目显微镜放大零件图像, 并手动吹气来转动零件, 肉眼观察零件上下摆动幅度, 以确定零件是否合格. 人工检测依赖个人经验, 主观性强, 且易疲劳, 导致产

品质量管理的不稳定, 难以量化评估. 采用视觉技术进行检测是大势所趋, 其能有效保证产品检测的准确度和稳定性.

一个优质的机器视觉系统必须具备以下几点: 第一, 所采用的光学系统必须成像清晰, 对比度好, 噪声少; 第二, 算法必须精确的计算出零件的边缘线; 第三, 算法必须具有一定的鲁棒性, 比如能够自动矫正倾斜的图像.

① 基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (11772301); 浙江省自然科学基金 (LY17F020016); 杭州师范大学第二轮专业学位研究生课程教学案例库建设, 工业智能制造项目 (横向)

Foundation item: General Program of National Natural Science Foundation of China (11772301); Natural Science Foundation of Zhejiang Province (LY17F020016); Second Round of Teaching Case Database Construction for Graduate Courses of Hangzhou Normal University

收稿时间: 2019-06-07; 修改时间: 2019-07-05; 采用时间: 2019-07-10; csa 在线出版时间: 2019-12-27

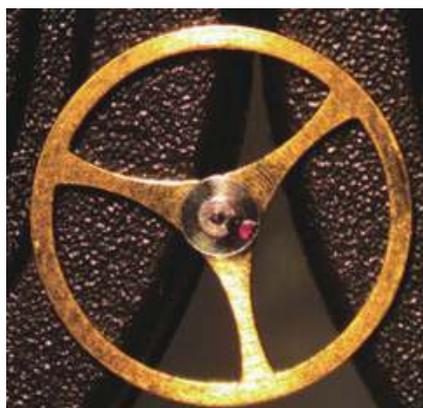


图1 摆轮

数字图像的基本单位是像素. 为了提高检测的精度, 需要进行亚像素的定位. 亚像素边缘检测是指将边缘附近的像素进行分解, 从而精确定位边缘^[1]. 常用的亚像素检测技术有矩法, 最小二乘方差法, 插值法, 拟合法等^[2,3]. 文献^[2,4-6]提出了基于二次曲线拟合的亚像素定位模型, 该模型在理想条件下定位精准度高. 文献^[7]提出了对二次多项式的最小二乘拟合求梯度的亚像素插值算法, 但模型比较复杂, 求解速度慢. 本文参考了以上文献中的理论, 使用一种基于局部区域特征的二次曲线模型来计算亚像素位置, 这种模型考虑了局部的特征和边缘梯度, 精确度高, 速度快, 能够满足项目的需要.

1 项目总体设计

1.1 光学方案设计

由于零件本身微小, 且检测的是轮面的平整度, 同时为了减少虚影提高图像对比度, 所以选择平行背光源. 镜头选择高分辨低畸变的远心镜头.

系统采用视频检测方式, 零件放置在专用的工作台上, 使用导气管吹动零件转动. 工作台如图2所示.

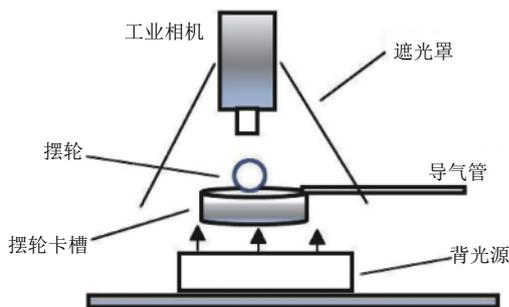


图2 摆轮工作台

1.2 算法框架

摆轮检测依次经历如下步骤: 图像采集与预处理, Canny 边缘检测, 倾角矫正, ROI (感兴趣区域) 亚像素位置计算, ROI 水平边缘和垂直边缘计算, 计算极差, 判定结果. 图3显示了这个流程框架.

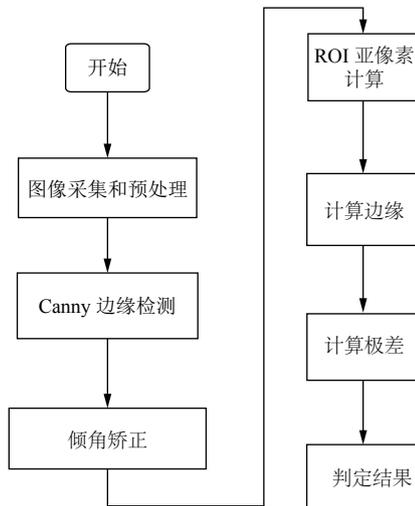


图3 流程框架

2 算法分析

2.1 图像采集和预处理

图像采集是将传感器检测到的图像信息传输到计算机的过程. 摆轮图像中背景为白色, 目标为黑色, 目标和背景的对比度明显, 使用常见几种阈值分割方法进行实验, 实验结果如图4所示.



图4 常见阈值方法分割效果

从上面的实验结果来看, OTSU 方法, 迭代阈值法, p 参数法效果都不错. p 参数法依赖于参数的设置, 固定的参数会使得算法的鲁棒性降低. OTSU 在细节体现上比迭代阈值法更好一些, 故选择 OTSU 法.

2.2 Canny 边缘检测

图像的边缘检测算法有很多, 常见的有 Robert, Sobel, Prewitt, Krisch, LOG, Canny 等算子^[8]. 使用 Canny 算子检测的效果如图5所示.

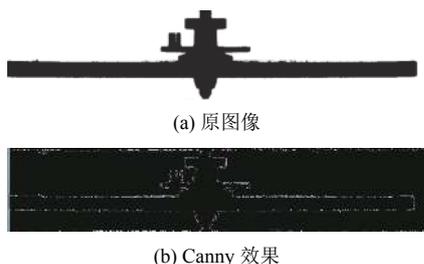


图5 Canny 边缘检测效果

Canny 算法能够满足项目需要,且使得后面霍夫直线检测时取得比较好的性能,所以选择 Canny 算子.

2.3 图像矫正

零件在拍摄的过程中容易存在一定的倾斜,根据先验知识,倾斜的角度一般在 30 度以内.目前常用的倾角矫正方法有:基于投影的方法、基于 Hough 变换、基于线性拟合等方法^[9].使用霍夫变换的方法能够矫正摆轮图像的倾斜,满足项目的需求.下面是常见的两类倾斜情况及其矫正结果,如图 6 所示.

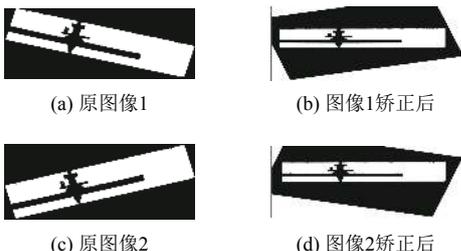


图6 图像矫正效果

从上面的实验结果可以看到,利用霍夫直线检测算法能够矫正常见的沿顺时针或逆时针具有一定倾斜角度的图像.

2.3.1 图像矫正流程

1) 基于 Canny 检测后的图像使用霍夫变换方法检测图像中的直线.霍夫变换本身比较耗时,但根据摆轮图像的特点只需要检测出 2 到 3 条比较长的水平直线,其余水平直线和垂直直线则全部忽略掉.当设置直线检测阈值为 500 像素点时即可达成上述目标.这样能大大提高霍夫算法的效率.

2) 对于每条检测出的直线,获取其倾角 θ ,如图 7 所示.

当 $\theta \in \left[\frac{\pi}{2}, \frac{3\pi}{4} \right] \cup \left[\frac{5\pi}{4}, \frac{3\pi}{2} \right]$ 时认为是水平直线倾斜后的结果,属于其他区间时忽略掉.统计这些直线的倾角

并取其平均值作为最终的图像倾角 α .

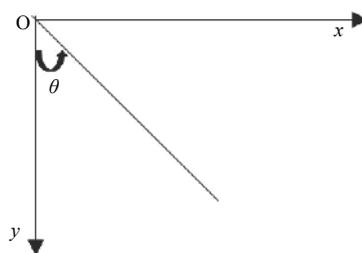


图7 图像坐标系

3) 旋转图像至水平位置.设 β 为图像需要旋转的角度,则有:

$$\beta = \alpha - \frac{\pi}{2} \tag{1}$$

图像旋转的步骤如下:

第 1 步,把图像坐标系的原点从左上角转移到图像中心.

第 2 步,旋转所有像素点.

第 3 步,把旋转后的图像平移到原来的图像坐标系中.

2.4 ROI 亚像素计算

在该项目中我们使用了 5×3 的模板,考虑每个可能的边缘像素,然后在模板区域内计算一个二次曲线模型,利用此模型计算亚像素位置.二次函数模型是在一次函数模型的基础上推导出来的,所以先介绍一次函数模型.

2.4.1 一次函数模型

如图 8 所示,假设直线 $L: y = kx + b$ 是图像中的边缘,且 L 将图像区域分成上下两部分,分别记做 M, N .这两部分的面积记做 S_M, S_N , M, N 也表示 M, N 两部分的平均灰度值.直线 L 所在的坐标系的中心点为 (i, j) .设 (i, j) 处像素的灰度值为 $F(i, j)$,它也代表整个模板区域的平均灰度值.设图像区域总面积为 S ^[2,5].则有:

$$S = S_M + S_N \tag{2}$$

$$F(i, j) = \frac{N \cdot S_N + M \cdot S_M}{S} \tag{3}$$



图8 一次函数模型

我们考虑中间像素 (i, j) 的 5×3 邻域模板, 以 $L2$ 、 $M2$ 和 $R2$ 来表示模板中直线 L 下侧左、中、右列的像素面积, 如图9所示. 直线 L 坐标系中心的位置依然是 $O(i, j)$, l 列中心的横坐标是 $i-1$, r 列中心的横坐标是 $i+1$; 最上一行的中心纵坐标是 $j+2$, 最下一行中心位置的纵坐标是 $j-2$; 设每个像素格的边长为 w ^[2,5].

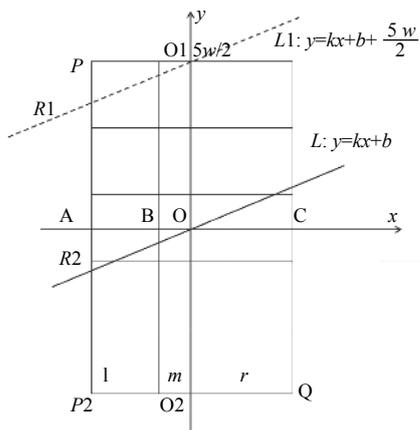


图9 5x3 模板

$$L2 = \int_{-\frac{3w}{2}}^{-\frac{w}{2}} \left(kx + b + \frac{5w}{2} \right) dx = \left(\frac{5}{2} - k \right) w^2 + bw \quad (4)$$

$$M2 = \int_{-\frac{w}{2}}^{\frac{w}{2}} \left(kx + b + \frac{5w}{2} \right) dx = \frac{5}{2} w^2 + bw \quad (5)$$

$$R2 = \int_{\frac{w}{2}}^{\frac{3w}{2}} \left(kx + b + \frac{5w}{2} \right) dx = \left(\frac{5}{2} + k \right) w^2 + bw \quad (6)$$

设 5×3 模板中左边一列的像素灰度值之和为 T_l , 中间一列为 T_m , 右边一列为 T_r , 则有:

$$T_l = \sum_{J=j-2}^{j+2} F(i-1, J) \quad (7)$$

代入式(3), 可得:

$$T_l = 5N + \frac{M-N}{S} \sum_{j-2}^{j+2} S_M$$

其中, $\sum S_M = L2$, 所以, 可得:

$$T_l = 5N + \frac{M-N}{S} L2 \quad (8)$$

同理, 可知:

$$T_m = \sum_{J=j-2}^{j+2} F(i, J) = 5N + \frac{M-N}{S} M2 \quad (9)$$

$$T_r = \sum_{J=j-2}^{j+2} F(i+1, J) = 5N + \frac{M-N}{S} R2 \quad (10)$$

2.4.2 二次函数模型

一次函数可以看做是二次函数当二次项系数为0时的特例, 所以使用二次函数模型来预测亚像素的位置会比一次函数模型更普遍一些. 在二次函数模型中我们还可以求得边缘的曲率, 这样对边缘的描述会更准确. 二次函数模型预测亚像素位置如图10所示. 各数学符号还保持前面的定义, 假设抛物线 $f: y = ax^2 + bx + c$ 为图像中的边缘.

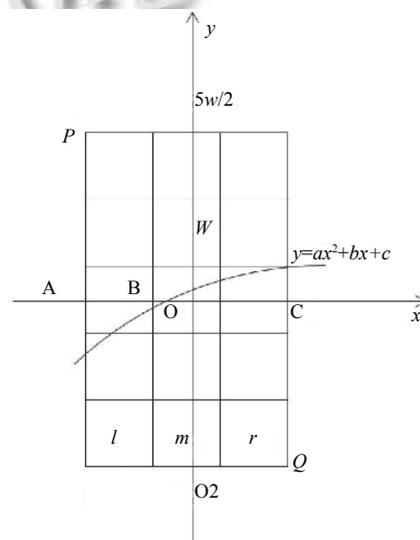


图10 二次函数模型

边缘下侧左、中、右部分面积计算^[2,4-6]:

$$L2 = \int_{-\frac{3w}{2}}^{-\frac{w}{2}} \left(ax^2 + bx + c + \frac{5w}{2} \right) dx = \frac{13}{12} aw^3 + \left(\frac{5}{2} - b \right) w^2 + cw \quad (11)$$

$$M2 = \int_{-\frac{w}{2}}^{\frac{w}{2}} \left(ax^2 + bx + c + \frac{5w}{2} \right) dx = \frac{1}{12} aw^3 + \frac{5}{2} w^2 + cw \quad (12)$$

$$R2 = \int_{\frac{w}{2}}^{\frac{3w}{2}} \left(ax^2 + bx + c + \frac{5w}{2} \right) dx = \frac{13}{12} aw^3 + \left(b + \frac{5}{2} \right) w^2 + cw \quad (13)$$

由前面的推导过程可知, 式(8), (9), (10)在二次函数模型中依然成立. 将式(11), (12), (13)代入式(8), (9), (10)中, 可以得到包含了 a, b, c 三个变量的三个方程, 解之, 可得 a, b, c 的值.

$$a = \frac{T_l + T_r - 2T_m}{2(M - N)} \quad (14)$$

$$b = \frac{T_r - T_l}{2(M - N)} \quad (15)$$

$$c = \frac{2T_m - 5(M + N)}{2(M - N)} - \frac{1}{12}a \quad (16)$$

由式 (16) 可知, 二次函数模型下真实的像素点 (i, j) 对应的亚像素位置为 $(i, j-c)$.

在上面的公式中, M, N 代表了边缘两侧平均灰度值, $|M-N|$ 则代表了边缘两侧的梯度幅值, 其方向为边缘的梯度方向.

如图 11 所示, 设点 $O(i, j)$ 处沿 x 方向的偏导数为 f_x , 沿 y 方向的偏导数为 f_y , 当 $f_x \cdot f_y > 0$ 时, 设 $\Delta x = 1$; 当 $f_x \cdot f_y \leq 0$ 时, $\Delta x = -1$.

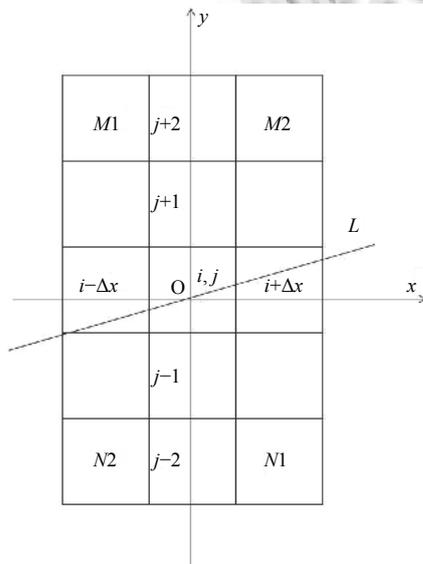


图 11 图像强度

$$M = \frac{1}{2} [F(i, j+2) + F(i+\Delta x, j+2)] \quad (17)$$

$$N = \frac{1}{2} [F(i-\Delta x, j-2) + F(i, j-2)] \quad (18)$$

将式 (17), 式 (18) 代入前面的公式, 即可求得二次函数模型下的亚像素位置.

在使用上述模型之前必须先粗略定位出边缘的位置. 对于每个边缘点, 使用上述模型求解亚像素位置.

2.5 计算边缘直线

如图 12 所示, 我们需要描绘出 ROI 中摆轮边缘的直线. 此处 ROI 就是方框的区域. 可以使用投影法来生

成直线. 投影法是通过计算图像在水平和垂直边缘上的像素点的个数来确定边缘的位置^[10].



图 12 ROI 摆轮边缘直线

计算水平直线的方法如下. ROI 中以行为单位, 每行的像素数累计起来, 相当于往 y 轴上投影, 按照式 (19) 的方式进行统计. $f(i, j)$ 为 (i, j) 处的像素值. 为了利用计算前面得到的亚像素位置, i, j 的增量都设置为 0.5 像素, 即将 1 个像素点分解为 4 个亚像素点, 这样就可以将边缘精确到 0.5 像素.

$$Hi = \sum_{j=0}^{\Delta x} f(i, j) \quad (19)$$

其中, 当 $f(i, j) > 100$ 时, $f(i, j) = 1$, 当 $f(i, j) \leq 100$ 时, $f(i, j) = 0$, Δx 是 ROI 在 x 轴方向的长度.

在图 12 中, 从上往下依次是白色区域, 黑色区域, 白色区域, 所以生成的 Hi 数组从上往下会依次出现峰, 谷, 峰, 取靠上的峰值处的纵坐标 y_0 为生成的水平线段 $L1$ 的起点 $P1$ 的纵坐标, $L1$ 的终点 $P2$ 的纵坐标也取 y_0 , $P1, P2$ 的横坐标取 ROI 的沿 x 轴方向的起点和终点的横坐标, 连接 $P1, P2$ 即得到水平线段 $L1$. 如图 13 所示.

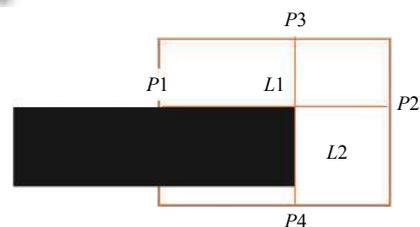


图 13 边缘直线

生成边缘垂直线的方法与上面生成水平线的方法类似. 只是在计算 ROI 投影时, 以列为单位, 统计每列的像素数, 相当于往 x 轴投影, 如式 (20) 所示.

$$Vi = \sum_{i=0}^{\Delta y} f(i, j) \quad (20)$$

其中, 当 $f(i, j) > 100$ 时, $f(i, j) = 1$, 当 $f(i, j) \leq 100$ 时,

$f(i, j) = 0$, Δy 是 ROI 在 y 轴方向的长度。

在图 12 中, 从左往右依次是包含黑色区域, 纯白色区域, 所以生成的 V_i 数组从左往右必然是谷, 峰, 取峰值处的横坐标 x_0 为生成的垂直线段 $L2$ 的起点 $P3$ 的横坐标, $L2$ 的终点 $P4$ 的横坐标也取 x_0 , $P3, P4$ 纵坐标取 ROI 沿 y 轴方向的起点和终点的纵坐标, 连接 $P3, P4$ 即得到图 13 中的垂直线段 $L2$ 。

2.6 计算极差

视频检测时软件连续的采集帧. 对于每一帧, 进行上述的处理, 生成摆轮的水平边缘线和垂直边缘线. 摆轮的平面是否平整反映在数据上就是生成的水平线的位置的偏差大小. 统计同一个零件的一定数量的帧的水平线位置的极差, 依据极差判断出摆轮表面平整度是否合格. 另外, 工厂还需检测摆轮的边缘处弧度是否标准, 这可以通过图 13 中一定数量帧的垂直线的极差来判断。

3 结果分析

按照机械手表行业的规定, 2 g 微型摆轮产品合格的标准是端跳、径跳最大偏差都不大于 2 丝. 端跳对应图 13 中垂直边缘, 径跳则对应水平边缘. 系统计量的单位是像素, 摆轮的度量单位是丝。

如图 14 所示, 获取到摆轮上下边缘直线的纵坐标 y_1, y_2 , 经检测 $\Delta y = y_2 - y_1 = 908 - 814 = 94$ 像素, 已知摆轮设计的厚度为 47 丝, 所以得到下面的换算关系:

$$1 \text{ 像素} = 0.5 \text{ 丝} \quad (21)$$

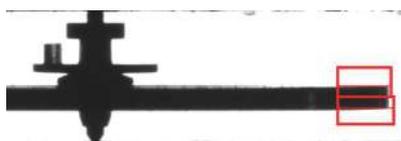


图 14 摆轮厚度计算

这样, 在统计动态极差的时候以不大于 4 像素作为合格的标准。

为了检测算法的稳定性, 对 400 个摆轮零件进行了测试, 其中 200 个合格品, 200 个不合格品. 对于每一个零件的检测结果, 都与人工检测结果进行比对. 软件检测结果如表 1 所示。

表 1 检测结果

	被检数量	正确检测数量	误检数量	正确率 (%)
合格品	200	198	2	99
不合格品	200	200	0	100

经分析, 出错的原因在于 ROI 位置设置的有些远离摆轮末端, 重新设置至摆轮末端后, 这类误检情况没有再出现。

分析表明, ROI 的标记位置是一个影响因素. 正确的标记方法是将此区域标记在摆轮的末端, 如图 12 所示. 如果标记在远离末端位置, 零件旋转时靠中间的位置其摆动幅度较小导致统计的极差较小, 这样可能会导致误判. 检测系统使用背光源, 所以必须在周围遮光的条件下进行, 如果周围有亮光射入实验台就可能干扰实验结果。

选取有代表性的 7 个合格品和 7 个缺陷品, 其测试数据见表 2. 表中偏差值的单位是像素。

表 2 对比实验

产品序号	端跳偏差最大值	径跳偏差最大值	软件检测 (是否合格)	人工检测 (是否合格)
1	1.5	1.00	是	是
2	1	4.00	是	是
3	2	2.00	是	是
4	3	3.50	是	是
5	2	2.50	是	是
6	2.5	4.00	是	是
7	2	4.00	是	是
8	1.5	6.50	否	否
9	1	5.50	否	否
10	0.5	7.50	否	否
11	0.5	6.00	否	否
12	0.5	4.50	否	否
13	4	4.50	否	否
14	4	6.50	否	否

系统检测实况如图 15 所示. OK 表示合格品, NG 表示缺陷品。

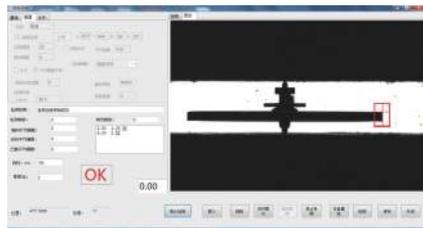
系统通过亚像素算法得到的像素点的位置是浮点型数据, 根据式 (22) 将亚像素位置精确到 0.5 像素的整数倍。

$$x = \begin{cases} [x], & x < [x] + 0.5 \\ [x] + 0.5, & x \geq [x] + 0.5 \end{cases} \quad (22)$$

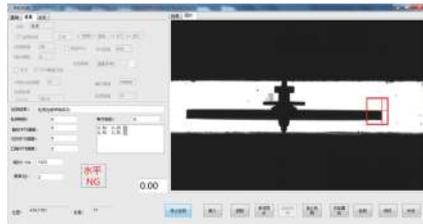
其中, x 表示偏差值, $x \geq 0$ 。

表 2 中, 产品序号为 2、6、7 的零件径跳最大偏差值都是 4 像素, 属于合格品. 产品序号为 12、13 的零件径跳最大偏差为 4.5 像素, 属于缺陷品. 系统在工厂进行了 6 个月的试运行, 具有 4、4.5 这样偏差数据的摆轮普遍存在, 系统检测的结论得到了充分的验证。

由实验中人工和软件检测结论的一致性可以进一步确定, 4 像素小于等于 2 丝, 4.5 像素大于 2 丝。



(a) 合格品



(b) 缺陷品

图 15 系统工作实况

$$\begin{cases} 4\text{像素} \leq 2\text{丝} \Rightarrow 0.5\text{像素} \leq 0.25\text{丝} \\ 4.5\text{像素} > 2\text{丝} \Rightarrow 0.5\text{像素} > 0.22\text{丝} \end{cases} \quad (23)$$

由此可知,使用 0.5 像素代表 0.25 丝的误差小于 0.03 丝。

在上述算法中,亚像素位置的计算对于准确度起着重要作用。项目中偏差值的精确度为 0.5 像素,在实验条件下,对应 0.25 丝的实际长度,这一对应关系误差小于 0.03 丝。这能够满足工厂对摆轮的检测要求。

4 结语

目前微型零件检测技术逐步向非接触式检测、数字化检测等方向发展^[1],引入机器视觉检测技术,既能保证检测的结果更加精确,可解释,又能弥补工人数量不足的问题,深受企业的欢迎。本文提出一种微型摆轮的机器视觉检测算法,算法的平均准确率为 99.5%,单帧检测时间平均 27 ms,一个零件可以在 2 秒钟之内检测出结果。实验结果表明:该算法能够实时和准确的检测摆轮的表面平整度和边缘整齐情况,能够满足工业

检测的要求。

目前工厂仍在使用人工上料,如果未来能够使用精密机械成批的上料,那么整体检测的效率会更高。

参考文献

- 1 吴鹏,徐洪玲,宋文龙,等.基于非线性四阶图像插值的亚像素边缘检测算法.哈尔滨工程大学学报,2015,36(2): 243-247. [doi: 10.3969/j.issn.1006-7043.201312057]
- 2 Trujillo-Pino A, Krissian K, Alemán-Flores M, et al. Accurate subpixel edge location based on partial area effect. Image and Vision Computing, 2013, 31(1): 72-90. [doi: 10.1016/j.imavis.2012.10.005]
- 3 凌程,耿修瑞,杨炜曦,等.一种改进的基于奇异值分解的亚像素级图像配准算法.中国科学院大学学报,2019,36(1): 101-108. [doi: 10.7523/j.issn.2095-6134.2019.01.014]
- 4 贺忠海,王宝光,廖怡白,等.利用曲线拟合方法的亚像素提取算法.仪器仪表学报,2003,24(2): 195-197. [doi: 10.3321/j.issn:0254-3087.2003.02.023]
- 5 赵爱明.基于二次曲线拟合的图像亚像素边缘定位算法.哈尔滨理工大学学报,2006,11(3): 68-70. [doi: 10.3969/j.issn.1007-2683.2006.03.022]
- 6 史成森.基于数字图像的亚像素边缘定位的研究[硕士学位论文].长春:吉林大学,2008.
- 7 Devernay F. A non-maxima suppression method for edge detection with sub-pixel accuracy. INRIA, 1995: 1-25.
- 8 何东健.数字图像处理.3版.西安:西安电子科技大学出版社,2015.160-174.
- 9 吴爽,祝进,王丙文,等.一种非直线倾斜的打印体汉字串图像矫正方法.信息技术,2017,(10): 146-149,159. [doi: 10.13274/j.cnki.hdzt.2017.10.035]
- 10 但斌斌,梅文浩,伍世虔,等.畸变车牌定位与矫正方法研究.制造业自动化,2019,41(3): 7-11. [doi: 10.3969/j.issn.1009-0134.2019.03.003]
- 11 袁冬冬,应俊,解利军,等.基于机器视觉的轴承防尘盖检测算法.计算机系统应用,2019,28(1): 212-215. [doi: 10.15888/j.cnki.csa.006708]