

测试技术

精冲件轮廓缺陷在线检测技术

张昊武¹, 彭 群², 杨泽亚¹, 李佳盈¹, 杜贵江², 李 峰², 郭 康¹

(1. 中国机械总院集团北京机电研究所有限公司, 北京 100083;

2. 中国机械总院集团北京机电研究所有限公司扬州分公司, 江苏 扬州 225127)

摘要: 为提高平板厚板型精冲件的轮廓检测速度与精度, 基于机器视觉技术, 研究了一种轮廓缺陷在线检测技术。利用 Canny 算子从均值偏移滤波后图像中提取边缘线, 然后根据标准轮廓(模板)的尺寸, 从中挑选出需要检测的轮廓。由于待检测轮廓与模板存在角度与位移偏差等问题, 提出了一种先角度配准、再位置配准的两步图像配准算法, 将配准后的待检轮廓与模板进行图形比对, 差异图像经过形态学滤波等算法处理, 获得缺陷区域的尺寸及位置, 由此实现精冲件的在线检测。基于研究成果设计开发了一套零件在线检测系统, 并进行了实验验证。结果表明, 该系统能够识别的零件精度达 0.4 mm, 每件识别时间小于 0.3 s, 完全能够满足大批量精冲零件的轮廓缺陷在线检测的需求。

关键词: 机器视觉; 在线检测; 精冲件; 图像配准; 轮廓检测

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2022.12.031

中图分类号: TP391.4; TP23

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2022) 12-0206-06

Online detection technology on contour defects for fine blanking parts

Zhang Haowu¹, Peng Qun², Yang Zeya¹, Li Jiaying¹, Du Guijiang², Li Feng², Guo Kang¹

(1. Beijing Research Institute of Mechanical & Electrical Technology Co., Ltd. CAM, Beijing 100083, China;

2. Beijing Research Institute of Mechanical & Electrical Technology Co., Ltd. CAM, Yangzhou Branch, Yangzhou 225127, China)

Abstract: In order to improve the speed and accuracy of contour detection for fine blanking parts of thick and flat plates, an online detection technology for contour defects was studied based on machine vision technology. Then, the edge lines were extracted from the mean shift filtered image by the Canny operator, and according to the size of standard contours (templates), the contours to be detected were selected. Due to the problems of angle and displacement deviation between the contour to be detected and the template, a two-step image registration algorithm was proposed, which first registered the angle and then registered the position, and the registered contour to be detected was graphically compared with the template. Furthermore, the difference image was processed by the algorithms such as morphological filtering to obtain the size and location of the defect area, thereby realizing the online detection of fine blanking parts. Finally, based on the research results, a set of online detection system for parts was designed and developed, and the experimental verification was carried out. The results show that the system can recognize parts with the accuracy of 0.4 mm, and the recognition time of each part is less than 0.3 s, which can fully meet the needs of online detection for contour defects in mass fine blanking parts.

Key words: machine vision; online detection; fine blanking parts; image registration; contour detection

汽车用精冲件往往具有形状不规则的轮廓, 在实际生产中由于模具损坏、模具异物、送料走偏等诸多原因会使精冲件轮廓产生缺陷^[1]。这些缺陷对汽车用精冲件来说往往是致命性的, 必须予以杜绝。轮廓缺陷的检测方法一般分为接触式和非接触式两大类。对于高精度检测, 一般使用检具、三坐标测量仪等接触式测量设备或者投影仪等非接触式测量

设备进行检测。对于低精度的轮廓和外观检测, 则往往使用人工目测。前者效率太低, 后者精度低而且漏检误判的现象时有发生。因此, 急需一种高效、精确的轮廓在线检测技术以满足汽车行业对精冲产品质量的严格要求。

机器视觉是一种可以提高零件检测的准确度和自动化程度的新技术。随着该技术的不断发展和进步, 越来越多不适于人工作业的危险工作环境或者难以满足检测要求的场合逐渐被基于机器视觉技术开发的各种检测系统所替代。机器视觉技术作为一种非接触测量方式, 在工业制造、纺织业和食品筛选等领域发挥了重要作用。在机器视觉的图像分割、

收稿日期: 2022-06-02; 修订日期: 2022-09-10

作者简介: 张昊武 (1996-), 男, 硕士研究生

E-mail: tony_insect@163.com

通信作者: 彭 群 (1971-), 男, 硕士, 研究员

E-mail: pengqun89@163.com

配准和缺陷检测等应用研究领域,国内外发展出了许多算法^[2-9]。文献[2]提出了一种旋转模板匹配算法,利用金字塔算法和 Hu 矩进行粗匹配获取候选区域,再利用 Zernike 矩的相位信息多次迭代计算出精确角度,鲁棒性强。文献[3]提出了一种基于 Hu 不变矩的图像匹配进化算法(Image Matching Evolutionary Algorithm, IMEA),并证明了 IMEA 算法的鲁棒性和效率。文献[4]采用改进的二维经验模态分解(Bidimensional Empirical Mode Decomposition, BEMD)的提取算法,可以滤掉金属表面的复杂纹理,随后进行 Canny 边缘检测,对金属表面缺陷有较好的效果。文献[5]针对铣头刀片,提出了一种无需完整刀片的图像参考即可评估切削刃状态的新算法,可自动确定给定图像中切削刃的理想位置和方向,并计算与实际切削刃的偏差。

对大批量精冲件的轮廓质量控制是保证产品质量的关键所在,常用的检测方法由于检测效率低或者检测精度不符合要求,不容易准确标记出缺陷的具体位置,难以满足检测要求。为了高效、精确地对精冲件轮廓进行实时检测,本文对其轮廓缺陷的在线检测技术进行研究,提出了一种两步图像配准算法,将配准后的图像与模板进行比较,进而识别和标记出缺陷区域,由此开发了一套零件在线检测系统,并对该检测系统进行了研究与实验验证。

1 检测技术整体设计

本文所研究的精冲件轮廓缺陷在线检测技术方案如图 1 所示。在连续生产环境中,当有零件进入拍照区域时,相机会立即采集零件图像,并将原始图像传递到计算机中进行处理。原始图像首先会经过滤波处理以获得清晰的轮廓边缘,接着对滤波后

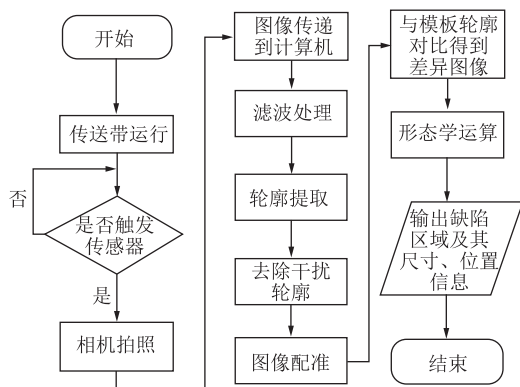


图 1 精冲件轮廓缺陷在线检测技术流程图

Fig. 1 Flow chart of online detection technology for contour defects of fine blanking parts

的图像进行轮廓提取,去除干扰线条,得到待检测轮廓。待检测轮廓利用两步图像配准算法进行图像配准之后与模板进行对比得到差异图像。最后利用形态学运算去除差异图像中的阴影等干扰信息,获得实际的缺陷区域并计算出其尺寸与位置,由此实现轮廓缺陷的检测。

2 图像采集与预处理

本文以图 2a 所示的零件为研究对象展开研究,该零件长度约为 42 mm、宽度约为 38 mm、厚度为 4.5 mm,材质为 S45C 钢,是一种典型的精冲零件。

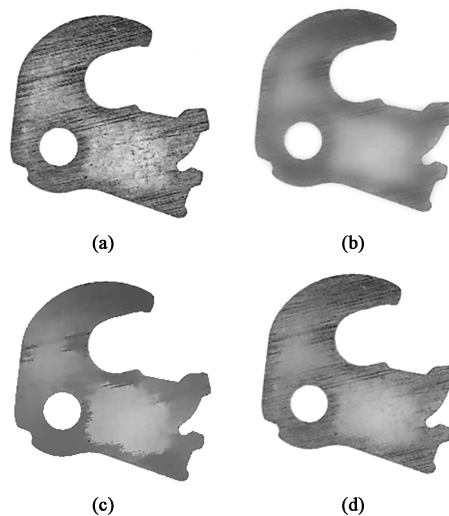


图 2 不同滤波器处理结果的对比

(a) 原始图片 (b) 双边滤波 (c) 均值偏移滤波 (d) 导向滤波

Fig. 2 Comparison of processing results for different filters

(a) Original picture (b) Bilateral filter (c) Mean shift filter (d) Guided filter

对该零件进行图像采集时,由于内外部的干扰会产生噪声,给后续处理带来一定的难度,因此,首先需要减弱噪声。图像滤波作为广泛使用的图像减噪预处理操作,在尽可能保留图像细节特征的前提下,对目标图像的噪声进行抑制。对于轮廓检测,滤波应当尽可能保留边缘而忽略纹理信息。本文研究比较了 3 种边缘保持滤波器:双边滤波、均值偏移滤波和导向滤波。为显示清晰,图 2 中的图片经反色处理。对比原始图片(图 2a)可知,双边滤波(图 2b)减弱低频噪声的同时,对梯度大的边缘信息有很好的保留。均值偏移滤波(图 2c)实际上是一种图像在色彩层面的平滑滤波,可以中和色彩(或灰度值)分布相近的颜色,平滑色彩细节,侵蚀掉面积较小的颜色区域,处理后的结果与双边滤波类似,在特定情况下对于边缘的处理甚至更好一

些。导向滤波(图 2d)是通过一张引导图 Q , 对初始图像 P (输入图像) 进行滤波处理, 使得最后的输出图像大体上与 P 相似, 但是纹理部分与 Q 相似^[10]。当 Q 与 P 为同一个图像时, 导向滤波可作为一个保边滤波器。

通过比较 3 种滤波处理的结果(图 2b~图 2d)。发现经过均值偏移滤波的图像纹理被减弱, 轮廓更突出, 优于其他两种滤波方法。对精冲件来说, 均值偏移滤波方法是较适宜的轮廓预处理算法。

3 缺陷检测

3.1 轮廓提取

为了从预处理后的图片中获得精冲零件的清晰的轮廓边缘, 本文研究对比了 Laplacian、Sobel 和 Canny^[11] 3 种边缘检测算法, 研究表明 Canny 算法是适宜精冲件的轮廓提取算法。Canny 算法使用了双阈值方法, 较大的阈值为上界, 较小的阈值为下界, 梯度大于上界的点被认定为强边界点, 梯度小于下界的点为非边界点。而梯度位于两者之间的点, 若与强边界相连, 则也认为是边界点。由于精冲件的图像是在运动场景下实时采集获得的, 其图像灰度的绝对值有时会由于位置流动所导致的光照变化而产生较大的差异。研究表明, Canny 算法使用的双阈值方法的效果优于仅根据灰度值梯度进行边缘提取的方法。由于传送带杂物、零件反光、零件阴影等的存在, 滤波并不能完全去除干扰信息, 在边缘检测后仍会存在一些干扰线条, 如图 3 所示, 此时需要对其进行甄别。以轮廓提取质量较好的图 4 (图片尺寸为 2000 pixel×1520 pixel, 映射成实际尺寸为 106.5 mm×80.9 mm) 作为模板图片, 可测得该零件的外轮廓周长为 193.3 mm、面积为 1103.2 mm², 内孔周长为 25.4 mm、面积为 50.2 mm²。设置采集的范围为: 周长大于 20 mm, 面积大于 40 mm²。可



图 3 图像配准前的含干扰的轮廓

Fig. 3 Contours with interference before image registration

以剔除细小的干扰线条, 准确获得外轮廓与内孔, 其中周长小于 30 mm、面积小于 60 mm² 的轮廓线为内孔, 将去除干扰后的轮廓作为待匹配轮廓。

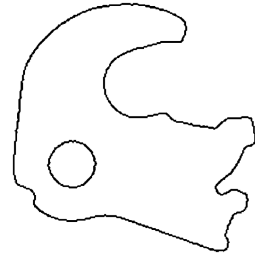


图 4 Canny 边缘检测算法检测后的模板轮廓

Fig. 4 Template contours after detection by Canny edge detection algorithm

3.2 两步图像配准算法

为了使待匹配轮廓能够与模板轮廓进行精确对比, 以识别轮廓缺陷, 本文提出一种两图像步配准算法来进行图像配准。算法的第 1 步为角度配准, 常用的匹配方法有直接匹配或极坐标匹配。直接匹配法需要将标准图在 360°范围内旋转, 每隔 1 个步距建立 1 个模板, 角度精度取决于步距的大小, 步距较小时匹配精度较高, 但会导致建立的模板数和匹配次数较多, 大幅降低了计算速度。而极坐标匹配法采用待匹配的极坐标图在模板极坐标图上滑动匹配获得最佳位置, 只需要 1 次匹配即可计算出角度, 大大提高了计算速度。本文研究的这类轮廓不规则的精冲件, 其内部往往有圆孔, 可作为匹配的定位基准, 若没有内孔则可以在模板上选择适宜的角点作为定位基准。研究测试表明, 使用极坐标匹配法能够更迅速地实现零件的旋转配准, 具有速度快、配准精度高等优点。

极坐标匹配法首先利用轮廓的最小外接矩形将零件框选起来, 内孔的最小外接矩形中心即为圆心, 以圆心为极点进行极坐标展开。将坐标为 (i, j) 的像素点按照极坐标变换式 (1) 和式 (2) 映射到另一幅空白图像中坐标为 (r, θ) 的点。同样地, 将模板轮廓以极坐标展开, 将两个周期拼接到一起, 以此作为极坐标模板 (图 5 中 a 区域)。极坐标模板图的宽度为 $2w$ (w 为 1 个周期的极坐标图宽度)。图 5 中 b 区域为待匹配极坐标图在极坐标模板图上匹配到的区域, 其宽度为 w 。图 5 中 b 区域的左边界距图 5 中 a 区域的左边界的距离为 d , 按照图像尺寸比例折算为角度, 即旋转角度 $\alpha = d \times 360^\circ / w$ 。

$$r = \sqrt{i^2 + j^2} \quad (1)$$

$$\theta = \arctan\left(\frac{j}{i}\right) \quad (2)$$

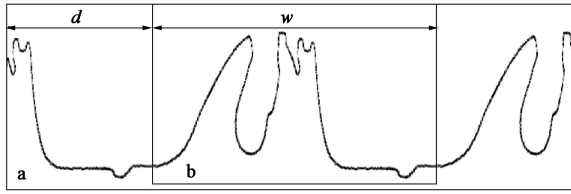


图 5 极坐标模板上的匹配结果

Fig. 5 Matched results on polar coordinate template

随后对待匹配轮廓进行填充，先将外轮廓内部像素点填充为黑色（即灰度值赋值为 0），再把内孔内部像素点填充为白色（即灰度值赋值为 255），得到的结果如图 6 所示。接着旋转 $-\alpha$ 角度，使其与标准轮廓角度相同，然后将模板轮廓的填充图 m 在旋转后的待匹配图像上进行滑动匹配，截取最佳匹配区域 n ，即实现第 2 步的位置配准。最后将 m 与 n 进行异或运算，得到的结果如图 7 所示。



图 6 待匹配的轮廓填充图

Fig. 6 Contour filling diagram to be matched



图 7 异或运算结果

Fig. 7 Result of XOR operation

3.3 缺陷的识别与标记

由图 7 可知，异或运算结果的轮廓中包含着一些细线条，这是由于精冲零件有较大的厚度，使得采集所得的图像边缘不可避免地包含有阴影噪声。经过研究分析，形态学开运算能够较好地消除阴影噪声的影响，可以去除图像中孤立的小点和小桥，而需要保留部分（缺陷区域）的形状和面积基本不变。

开运算腐蚀操作的数学表达为：

$$A \ominus B = \{(x, y) \mid (B)_{xy} \subseteq A\} \quad (3)$$

开运算膨胀操作的数学表达为：

$$A \oplus B = \{(x, y) \mid (B)_{xy} \cap A \neq \emptyset\} \quad (4)$$

式中： A 为待处理图像； $(B)_{xy}$ 为结构元素； (x, y) 为结构元素的原点坐标，本文中结构元素为 3×3 的矩形，原点位于其中心； \emptyset 为空集； \ominus 、 \oplus 分别为腐蚀和膨胀运算的标识符。

形态学滤波得到的缺陷部分如图 8 中圆圈内部部分所示，在填充图中显示的效果如图 9 所示。

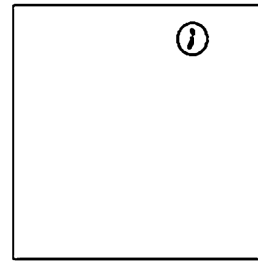


图 8 形态学开运算结果

Fig. 8 Result of morphological opening operation

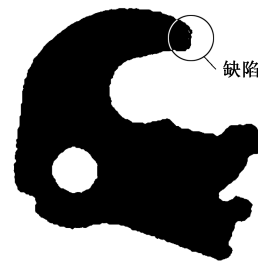


图 9 填充图中显示的缺陷

Fig. 9 Defects displayed in filling diagram

4 算法实现及实验验证

基于上述算法及相关研究成果，本文设计开发了一套精冲件轮廓缺陷的在线检测系统，对研究成果进行实验验证，并与常用的轮廓检测算法 Hu 不变矩法^[2-3,12]进行应用比较。

4.1 Hu 不变矩法

Hu 不变矩法是一种描述图像形状、几何特征的方法，其根据图像的归一化中心距进行组合，构造了 7 个特征矩。对于离散的数字图像 $f(x', y')$ ，其 $p+q$ 阶中心矩 m_{pq} 定义为：

$$m_{pq} = \sum_{x'=1}^M \sum_{y'=1}^N f(x', y') (x' - x_0)^p (y' - y_0)^q \quad (5)$$

式中： (x_0, y_0) 为图像重心； (x', y') 为图像中像素点的坐标； M 和 N 分别为图像的宽度和高度方向的像素点数量； $p=0, 1, 2, \dots$ ； $q=0, 1, 2, \dots$ 。

归一化的 $p+q$ 阶中心矩 n_{pq} 为：

$$n_{pq} = \frac{m_{pq}}{m_{00}^{(p+q+2)/2}} \quad (6)$$

式中: m_{00} 为 $p=0$ 、 $q=0$ 时图像的 $0+0$ 阶中心距,

$$\text{即 } m_{00} = \sum_{x'=1}^M \sum_{y'=1}^N f(x', y').$$

Hu 不变矩的第 z 个特征矩 hu_z ($z=0, 1, 2, \dots, 6$) 为:

$$\begin{cases} hu_0 = n_{20} + n_{02} \\ hu_1 = (n_{20} - n_{02})^2 + 4n_{11}^2 \\ hu_2 = (n_{30} - 3n_{12})^2 + (3n_{21} - n_{03})^2 \\ hu_3 = (n_{30} + n_{12})^2 + (n_{21} + n_{03})^2 \\ hu_4 = (n_{30} - 3n_{12})(n_{30} + n_{12})[(n_{30} + n_{12})^2 - 3(n_{21} + n_{03})^2] + (3n_{21} - n_{03})(n_{21} + n_{03}) \cdot [3(n_{30} + n_{12})^2 + (n_{21} + n_{03})^2] \\ hu_5 = (n_{20} - n_{02})[(n_{30} + n_{12})^2 - (n_{21} + n_{03})^2] + 4n_{11}(n_{30} + n_{12})(n_{21} + n_{03}) \\ hu_6 = (3n_{21} - n_{03})(n_{21} + n_{03})[3(n_{30} + n_{12})^2 - 3(n_{21} + n_{03})^2] - (n_{30} - 3n_{12})(n_{21} + n_{03}) \cdot [3(n_{30} + n_{12})^2 + (n_{21} + n_{03})^2] \end{cases} \quad (7)$$

式中: n_{20} 为 $p=2$ 、 $q=0$ 时归一化的 $0+2$ 阶中心距, 其他参数的含义同理。

相似度 I 的计算公式为:

$$I(E, F) = \sum_{z=0}^6 \left| \frac{hu_z^E - hu_z^F}{hu_z^E} \right| \quad (8)$$

式中: E 与 F 为两个待比较的轮廓, 设置 E 为标准轮廓; hu_z^E 、 hu_z^F 分别为 E 和 F 的第 z 个特征矩。

I 的结果越接近 0, 则两个轮廓越相似。

4.2 实验验证与结果对比

将本文算法 (第 3 节中图像配准与缺陷识别等) 与根据 Hu 不变矩计算相似度的方法进行比较。

本文使用 Python 作为检测系统的开发语言, 在 Intel Core i5-3570 处理器中运行, 算法代码在此环境中进行实验验证。其识别速度为每件 $0.21 \sim 0.29$ s。而精冲机每分钟的速度一般为 30 冲次, 双腔模具每分钟可以生产 60 件, 生产速度为每件 1 s。因此, 本系统完全可以满足在线检测的速度要求。此处仅挑选出 4 个有缺陷的精冲件作为代表进行了验证研究。拍摄 50 张合格零件的图像, 提取并筛选轮廓, 计算轮廓面积的均值, 如表 1 所示。

表 1 轮廓面积均值 (mm^2)

Table 1 Mean values of contour area (mm^2)

参数	外轮廓面积 S_{out}	内孔面积 S_{in}	实际面积 S
均值	1099.9	52.1	1047.8

选取这 4 个缺陷件与 50 个合格件进行测试, 部

分结果如表 2 所示, 其中: 缺陷面积是根据本文提出的算法计算得出的, 缺陷最大边长为缺陷区域最小外接矩形的长边, 相似度是根据 Hu 不变矩法计算得出的。表 2 中, 合格件 1 的相似度为 50 件中的最大值, 合格件 2 的相似度为 50 件中的最小值。合格件轮廓的细微误差 (设定最大边长小于 0.4 mm) 会在形态学运算时被过滤掉, 所以, 其缺陷面积显示为 0。由表 2 中的数据可知, 在合格件的相似度范围内 ($1.2 \times 10^{-2} \sim 6.1 \times 10^{-4}$) 包含了部分缺陷件 (如缺陷件 2), 所以, 根据 Hu 不变矩法计算相似度不能准确地识别出精冲零件轮廓的小缺陷。而本文的算法可以很好地将合格件与缺陷件进行区分, 可识别的缺陷面积至少为 0.16 mm^2 , 缺陷的最大边长至少为 0.4 mm , 并且可将缺陷位置标记出来。因此, 本文研究开发的算法对轮廓小缺陷的识别效果优于根据 Hu 不变矩计算相似度的方法。

表 2 零件测试结果

Table 2 Test results of parts

零件编号	本文提出的算法			Hu 不变矩法
	缺陷面积/ mm^2	占轮廓面积均值的 百分比/%	缺陷最大 边长/ mm	相似度 I
缺陷件 1	0.54	0.052	0.80	1.7×10^{-2}
缺陷件 2	0.93	0.089	0.98	1.1×10^{-2}
缺陷件 3	2.22	0.212	2.10	1.6×10^{-2}
缺陷件 4	0.16	0.015	0.40	4.1×10^{-4}
合格件 1	0.00	0.000	0.00	1.2×10^{-2}
合格件 2	0.00	0.000	0.00	6.1×10^{-4}

此外, 在常见的机器视觉软件 Halcon 和开源库 Opencv 中也有进行轮廓比对的相应算子, 如 Shape_based_matching、matchShape 等算子, 这些算法主要为 Hu 不变矩算法的具体实现。经过实验测试, 这些算法轮廓的检测结果与上述 Hu 不变矩算法类似, 本文算法在轮廓识别方面对合格件与缺陷件的区分效果优于这两者。

5 在线检测系统的结构搭建

检测系统主要由硬件设备和图像处理系统两部分构成。硬件设备包括成像平台、工业相机、照明装置、触发开关、plc 和其他执行机构。图像处理系统包括计算机设备和图像处理软件。

硬件设备如图 10 和图 11 所示。成像平台包括相机固定架和零件输送带。输送带利用差速原理, 从低速变至较高速的过程可以扩大相邻零件间的距



图 10 硬件结构实物

Fig. 10 Physical device structure

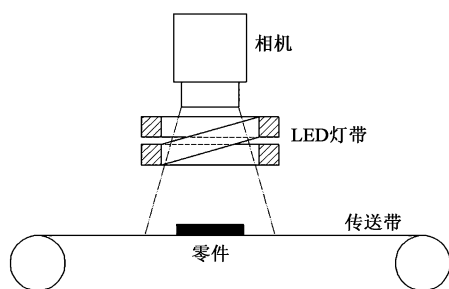


图 11 硬件结构示意图

Fig. 11 Schematic diagram of device structure

离，使零件依次通过相机下方，控制间距可以保证触发拍照时仅当前零件在视野内。为消除阴影，使用螺旋 LED 灯带作为光源。相机通过千兆网口连接到计算机（工控机），处理软件在需要时抓取相机拍摄的数字图像，随之进行处理，然后将处理的图像结果反馈到窗口显示，并将判断指令传递给下位机 plc。检测系统在实际生产环境中以每分钟 80 件的速度流畅运行，能够满足精冲零件在线检测的效率需求。

6 结论

(1) 针对汽车用精冲零件的在线检测系统的搭建完成及实际实施表明，本文提出的用于零件轮廓缺陷检测的两步配准图像算法是正确可行的。

(2) 检测系统可识别的缺陷的最大边长最小可达 0.4 mm，能够满足精冲件轮廓缺陷在线检测的精度要求。

(3) 检测系统的单个零件的检测时间小于 0.3 s，能够满足精冲件检测的效率需求。

(4) 本文的研究成果能够实现对平板精冲件内、外边缘轮廓处发生的多肉、过切等轮廓缺陷的准确、高效检测，但是对零件表面压痕、裂纹、麻坑等出现在非轮廓处的缺陷还无法检测，这些缺陷的检测是后期有待研究的重点。

参考文献：

- [1] 涂光祺. 精冲技术 [M]. 北京：机械工业出版社，2006.
Tu G Q. Fine Blanking Technology [M]. Beijing: China Machine Press, 2006.
- [2] 张俊凯. 一种快速的旋转模板匹配算法的设计与实现 [D]. 哈尔滨：哈尔滨工业大学，2013.
Zhang J K. Design and Implementation of a Novel Template Matching Algorithm Invariant to Rotation [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013.
- [3] Zhang R L, Wang L. An image matching evolutionary algorithm based on Hu invariant moments [A]. 2011 International Conference on Image Analysis and Signal Processing [C]. New York: IEEE, 2011.
- [4] Zhou A W, Zheng H, Li M, et al. Defect inspection algorithm of metal surface based on machine vision [A]. 2020 12th International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation [C]. New York: IEEE, 2020.
- [5] Fernández-Robles L, Azzopardi G, Alegre E, et al. Machine-vision-based identification of broken inserts in edge profile milling heads [J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2017, 44 (4): 276-283.
- [6] 黄鹏, 郑淇, 梁超. 图像分割方法综述 [J]. 武汉大学学报：理学版, 2020, 66 (6): 519-531.
Huang P, Zheng Q, Liang C. Overview of image segmentation methods [J]. Journal of Wuhan University: Natural Science Edition, 2020, 66 (6): 519-531.
- [7] 于志斌, 胡泓. 基于 YOLO 算法与机器视觉的晶圆片表面缺陷检测研究 [J]. 新型工业化, 2021, 11 (12): 114-117.
Yu Z B, Hu H. Research on wafer surface defect detection based on YOLO algorithm and machine vision [J]. The Journal of New Industrialization, 2021, 11 (12): 114-117.
- [8] 虞佳佳, 张耀, 何勇. 基于机器视觉的铝镍钴磁性材料外观缺陷检测的研究 [J]. 浙江工业大学学报, 2022, 50 (2): 143-148.
Yu J J, Zhang Y, He Y. Research on appearance defect detection of aluminum nickel cobalt magnetic materials based on machine vision [J]. Journal of Zhejiang University of Technology, 2022, 50 (2): 143-148.
- [9] 柳宗浦. 基于机器视觉的小型金属部件表面缺陷检测系统 [D]. 上海：东华大学，2009.
Liu Z P. On Machine Vision based Surface Flaw Detection System for Minitype Metal Parts [D]. Shanghai: Donghua University, 2009.
- [10] He K, Sun J, Tang X. Guided image filtering [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2013, 35 (6): 1397-1409.
- [11] Yuan L Y, Xue X. Adaptive image edge detection algorithm based on canny operator [A]. 2015 4th International Conference on Advanced Information Technology and Sensor Application [C]. New York: IEEE, 2015.
- [12] 仇瑞娜. 不规则冲压件轮廓缺陷视觉检测研究 [D]. 天津：河北工业大学，2018.
Qiu R N. Research on Visual Inspection for Contour Defects of Irregular Stamping Parts [D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2018.