

文章编号 1004-924X(2016)增-0229-08

异形冲压件轮廓视觉检测系统设计

陈海永^{1*}, 李泽楠¹, 孙鹤旭^{1,2}, 欧洋¹, 王亚男¹

(1. 河北工业大学 控制科学与工程学院, 天津 300130; 2. 河北科技大学, 河北 石家庄 050000)

摘要:针对异形冲压件轮廓缺陷的检测难题,设计了一个零件缺陷视觉检测系统。介绍了该系统的硬件组成和工作原理。根据冲压件的不规则形状采用水平集算法结合应用模型 Chan-Vese 来提取零件轮廓。设置能量函数,并通过优化能量函数使轮廓曲线逐渐逼近采集图像中冲压件的轮廓边界,有效抑制了噪声干扰提高提取精度。最后,采用 hu 不变矩轮廓匹配算法和面积匹配算法,通过多样本 hu 矩参数和面积采样设置阈值实现了缺陷零件的准确识别。该缺陷识别算法具有旋转、平移不变性和较好的鲁棒性。实验结果表明,此系统可检测出占整个异形零件 0.5% 以上的缺陷,缺陷检测精度高,能够满足异形零件轮廓稳定可靠、高精度等检测需求。

关键词:视觉检测;异形冲压件;水平集;轮廓提取;轮廓匹配

中图分类号:TP391.41;TP274 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20162413.0229

Visual detection system design for profile of special-shaped stamping parts

CHEN Hai-yong^{1*}, LI Ze-nan¹, SUN He-xu^{1,2}, OU Yang¹, WANG Ya-nan¹

(1. College of Control Science and Engineering,

Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China;

2. Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang 050000, China)

* Corresponding author, E-mail: haiyong.chen@hebut.edu.cn

Abstract: In order to realize the profile defect detection for the special-shaped stamping parts, a visual detection system was designed. The hardware components and working principle of the system were introduced. In this system, the profile of parts was extracted by using the level set method combined with Chan-Vese model based on its irregular shapes. In the Chan-Vese Model, energy function was set up and optimized in order to enable the profile curve approaching the profile boundary of the stamping parts in the collected image, thus effectively controlling the noise interference improving the extraction accuracy. Finally, the defect of the stamping parts was indentified according to the multi-sample hu moment parameter and areal sampling threshold which generated from the hu invariant-moment profile matching and area matching methods respectively. The defect identification method was characterized by rotation, translation invariance and good robustness. The results indicate that the system

收稿日期:2016-05-28;修订日期:2016-06-12.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 61203275);河北省自然科学基金资助项目(No. F2014202071);天津市特派员科技计划资助项目(No. 15JCTPJC55500)

can detect defects over 0.5% of the overall part with high detection precision, and is suitable for profile defect detection demand for high stability and security as well as high precision.

Key words: visual detection; special-shaped stamping parts; level set; profile extraction; profile matching

1 引言

随着产品的大规模批量化生产,对产品的质量检测精度要求越来越高。通常采用人工识别的方法对冲压件进行目测,但这种检测方法速度慢、效率低、工人劳动强度大,质量也难以保证。因此,将计算机图像检测技术应用于冲压件质量的检测具有重要的价值。随着工业技术和计算机技术的不断发展,很多检测项目从简单走向复杂,检测方式也从人工走向自动化甚至智能化。机器视觉利用机器代替人眼来做各种测量和判断,具有非接触、适应能力强、快速高效、准确、柔性好和可靠性高等特点,因此在现代工业检测中受到了广泛重视^[1-5]。

轮廓视觉检测技术广泛应用于车辆、医学、航天、石材、精密测量等领域^[6-8]。本文主要针对冲压过程中由定位器发生磨损变形、压力机滑块下死点位置调整、压边力小等因素导致的异形冲压件边缘缺陷,应用控制设备、传感设备、智能数字相机以及视觉检测匹配算法设计了缺陷视觉检测系统,介绍了用于轮廓检测的水平集和 Chan-Vese 模型提取轮廓,然后采用图像不变矩中的 hu 矩算法和面积匹配算法,来判断轮廓是否匹配,检验零件是否合格。本文针对零件缺陷的部分提出了面积匹配方法,可检测出缺陷大于整体面积 0.5% 以上的缺陷冲压件。实验证明所设计的异形冲压件检测系统能够较精确地检测出零件缺陷,具有非接触、柔性好、操作简单等特点。

2 检测系统结构及工作原理

2.1 视觉检测系统的硬件构成

图 1 为零件缺陷检测系统的原理图。该系统

主要由透明转盘、光源、光纤传感器、相机传感器、计算机、零件抓取设备和控制系统组成。

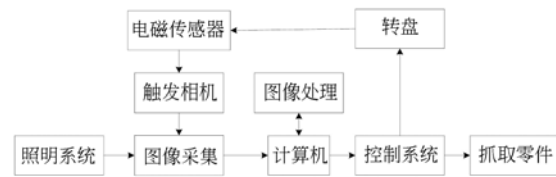


图 1 异形件轮廓视觉检测系统原理图

Fig. 1 Principle schematic of vision inspection system for irregular stamping parts

图像采集由 CMOS 相机完成。光纤传感器用于检测零件,并传输信号触发相机。然后对检测轮廓特征进行图像处理和匹配。照明系统安装在圆盘下方,以获得完整干扰少的零件轮廓,如图 2 所示。

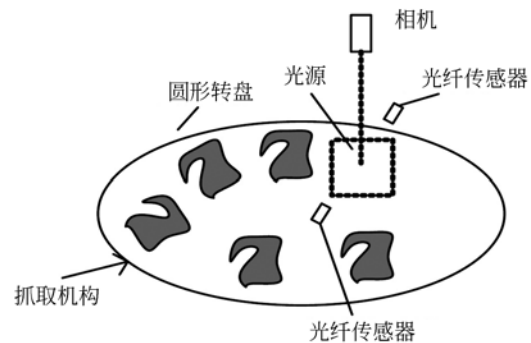


图 2 异形件轮廓视觉检测系统结构图

Fig. 2 Schematic diagram of vision inspection system for irregular stamping parts

2.2 视觉检测系统的工作原理

检测系统的工作过程为:透明转盘以恒定速度逆时针旋转,相机传感器垂直于透明转盘,光纤传感器处于相机和转盘之间,转盘下方安装有照明系统。当零件运动到光纤传感器之间时,光纤传感器会接收到检测零件信号,将信号传给控制系统,控制系统触发相机。相机采集照片并由计

算机处理,图像处理包括轮廓检测和轮廓匹配,图像处理判断零件是否合格,并将结果反馈给控制系统。控制系统控制抓取机构抓取零件,合格零件放入合格库否则放入回收库,从而完成零件的缺陷检测。

3 水平集轮廓检测与提取

3.1 水平集原理

水平集是指与实数 c 对应的可微函数 $f:R^n \rightarrow R$ 的水平集是实点集 $\{(x_1, x_1, \dots, x_n) \mid f(x_1, x_1, \dots, x_n) = c\}$,可微函数 f 为水平集函数。当 $n=2$ 时,称水平集为水平曲线;当 $n=3$ 时,称水平集为水平曲面。

水平集的主要思想是把低维描述为高维的水平集, n 维的演化过程转化成为一个基于 n 维变量的水平集函数 f 的演化过程。这种转化使得水平集函数 f 的水平常量 C 不变。水平集法可以解决曲线演化的问题,对于闭合曲线来说,偏微分方程的驱动下演化曲线从而分割图像,水平集方法中图像的分割过程相当于曲线的演化过程^[9-10]。

平面封闭曲线可隐式地表示为一个二维函数的水平集:

$$u(x, y) = c. \quad (1)$$

可将其看作三维曲面 $u = u(x, y)$ 与平面 $u = c$ 的交线。

假设平面封闭曲线的水平集隐式表达曲线 C 随时间变化,用于表示二维随时间变化的函数,其表达式如下:

$$C = \{(x, y) \mid u(x, y, t) = c\}. \quad (2)$$

曲线 C 可以看作时间 t 变化的三维曲面簇 $u = u(x, y, t)$ 与平面 $u = c$ 相交得到的水平集。

曲线演化的基本方程式如下:

$$\frac{du}{dt} = \frac{\partial u}{\partial t} + \nabla u \cdot \pm \frac{\partial(x, y)}{\partial t} = 0. \quad (3)$$

由于 $\frac{\partial(x, y)}{\partial t} = \left\{ \frac{\partial x}{\partial t}, \frac{\partial y}{\partial t} \right\} = V$, 于是得到:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} = -\nabla u \cdot V = -|\nabla u| \frac{\nabla u}{|\nabla u|} \cdot V = \\ |\nabla u| \mathbf{N} \cdot V = \beta \mathbf{N}, \end{aligned} \quad (4)$$

式中: $\beta = |\nabla u| \cdot V$ 为曲线的运动速度函数, \mathbf{N} 为曲线 C 的单位法矢量。曲线 C 的演化速度由速度函数决定。曲线的变形是由曲线点沿着法向矢

量的方向运动导致的。式(4)解释为:曲线在作用力的驱动下,沿着法向量 \mathbf{N} 以速度 β 演化。主动轮廓是单方向的,当速度函数 β 为正值时,轮廓向轮廓内部演化;当速度函数 β 为负值时,轮廓向轮廓外部演化。但需要注意的是,水平集轮廓提取方法主要依赖梯度判定演化的问题,抗噪能力差。因此,本文引入 Chan-Vese 模型来改善轮廓提取的可靠性。

3.2 Chan-Vese 模型

设定义域 Ω 上的演化曲线 C 是 $\omega \in \Omega$ 的边界,能量泛函表达为:

$$\begin{aligned} F(C, c_1, c_2) = \lambda_1 \int_{\text{inside}(C)} |u(x, y) - c_1|^2 dx dy + \\ \lambda_2 \int_{\text{outside}(C)} |u(x, y) - c_2|^2 dx dy + \mu l + \nu S, \end{aligned} \quad (5)$$

式中: $\lambda_1, \lambda_2 > 0, \mu \geq 0$ 也为参数, c_1 和 c_2 是演化轮廓内外的平均灰度值, $\text{inside}(C)$ 为演化轮廓线的内部区域, $\text{outside}(C)$ 为演化轮廓线的外部区域, l 为演化轮廓线的周长, S 为轮廓线内面积。该模型利用了图像的全局区域信息,通过优化 $F(C)$ 能够得出最终的分割曲线 $C(x, y)$ 和平均灰度值 c_1 和 c_2 , 分割结果为全局最优解^[11-13]。

设 φ 是根据演化曲线 $C(x, y)$ 的初始轮廓线构造的符号函数,得到 $\varphi(x, y) = 0$ 。 $\varphi(x, y, t)$ 为演化过程中的水平集函数,那么零水平集的演化曲线为:

$$C(x, y, t) : \{\varphi(x, y, t) = 0\}. \quad (6)$$

Heaviside 函数定义为:

$$H(x) = \frac{1}{2} \left[1 + \frac{2}{\pi} \arctan \left[\frac{\varphi}{\epsilon} \right] \right]. \quad (7)$$

Dirac 函数 $\delta(x)$ 定义为:

$$\delta(x) = \frac{1}{\pi} \frac{\epsilon}{\epsilon^2 + \varphi^2}. \quad (8)$$

能量泛函 F 中参数 l 和 S 可表达为:

$$l(\varphi = 0) = \int_{\Omega} |\nabla H(\varphi)| = \int_{\Omega} \delta(\varphi) |\nabla \varphi| dx dy, \quad (9)$$

$$S(\varphi \geq 0) = \int_{\Omega} \nabla H(\varphi) dx dy. \quad (10)$$

以及

$$\int_{\text{inside}(C)} |u - c_1|^2 dx dy = \int_{\Omega} |u - c_1|^2 H(\varphi) dx dy, \quad (11)$$

$$\int_{\text{outside}(C)} |u - c_2|^2 dx dy = \int_{\Omega} |u - c_2|^2 (1 - H(\varphi)) dx dy. \quad (12)$$

能量泛函 $F(\varphi, c_1, c_2)$ 表示为:

$$F(\varphi, c_1, c_2) = \mu \int_{\Omega} \delta(\varphi) |\nabla \varphi| + \int_{\Omega} H(\varphi) dx dy + \lambda_1 \int_{\Omega} |u(x, y) - c_1|^2 dx dy + \lambda_2 \int_{\Omega} |u(x, y) - c_2|^2 dx dy. \quad (13)$$

求最小化能量泛函公式 $F(C, c_1, c_2)$, 可计算出参数 c_1, c_2 分别为:

$$c_1(\varphi) = \frac{\int_{\Omega} u_1 H(\varphi) dx dy}{\int_{\Omega} H(\varphi(x, y)) dx dy}, \quad (14)$$

$$c_2(\varphi) = \frac{\int_{\Omega} u_2 (1 - H(\varphi)) dx dy}{\int_{\Omega} (1 - H(\varphi(x, y))) dx dy}, \quad (15)$$

其中: u_1 为曲线内部 $u(x, y)$ 的平均值, u_2 为曲线外部 $u(x, y)$ 的平均值. c_1, c_2 为定值, 最小化能量泛函, 得到关于 φ 的 Euler-Lagrange 方程:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} = \delta(\varphi) \left[\mu \operatorname{div} \left(\frac{\nabla \varphi}{|\nabla \varphi|} \right) - v - \lambda_1 (u(x, y) - c_1)^2 + \lambda_2 (u(x, y) - c_2)^2 \right], \quad (16)$$

$$\frac{\delta(\varphi)}{|\nabla \varphi|} \frac{\partial \varphi}{\partial n} = 0. \quad (17)$$

式(16)得到的 $\frac{\partial \varphi}{\partial t}$ 为曲线演化方程, 根据收敛后的 φ 得到最终的轮廓。

4 标准零件匹配

4.1 hu 不变矩

距是描述图像特征的算子, 在模式识别和图像分析中有重要的应用. 矩特征主要用于表征图像区域的几何特征, 又称为几何矩, 由于它具有旋转、平移、尺度等特性的不变特征, 所以被称为不变矩。

在图像处理中, 将图像的灰度值看作是一个二维或三维的密度分布函数, 那么几何矩方法即可用于图像分析领域并用于提取图像特征^[14-15]。

对离散数字图像 $f(x, y)$ 进行积分可得:

$$m_{pq} = \sum_{y=1}^N \sum_{x=1}^M x^p y^q f(x, y), \quad (18)$$

$$\mu_{pq} = \sum_{y=1}^N \sum_{x=1}^M (x - \bar{x})^p (y - \bar{y})^q f(x, y), \quad (19)$$

其中: \bar{x} 和 \bar{y} 代表图像的重心, 即有:

$$\bar{x} = m_{10} / m_{00}, \quad (20)$$

$$\bar{y} = m_{01} / m_{00}. \quad (21)$$

M 和 N 分别代表图像的宽度和高度. 归一化的中心矩定义为:

$$\eta = \mu_{pq} / (\mu_{00}^{\rho}), \quad (22)$$

其中: $\rho = (p + q) / 2 + 1$ 。

轮廓矩是通过轮廓上所有点进行积分运算得到的一个特征. 假设一个轮廓为 $I(x, y)$, 轮廓点个数为 N , 此轮廓的 (p, q) 矩如下定义:

$$m_{pq} = \sum_{i=1}^N x^p y^q I(x, y), \quad (23)$$

$$\mu_{pq} = \sum_{i=1}^N (x - \bar{x})^p (y - \bar{y})^q I(x, y), \quad (24)$$

其中: \bar{x} 和 \bar{y} 代表轮廓的重心, 归一化中心矩的求法同式(22). 利用上述公式可得到二阶和三阶中心矩, 能够构造 7 个不变矩 $M_1 \sim M_7$:

$$M_1 = \eta_{20} + \eta_{02}, \quad (25)$$

$$M_2 = (\eta_{20} - \eta_{02})^2 + 4\eta_{11}^2, \quad (26)$$

$$M_3 = (\eta_{30} - \eta_{03})^2 + (3\eta_{21} - \eta_{13})^2, \quad (27)$$

$$M_4 = (\eta_{30} + \eta_{03})^2 + (\eta_{21} + \eta_{13})^2, \quad (28)$$

$$M_5 = (\eta_{30} - 3\eta_{12})(\eta_{30} + \eta_{12})((\eta_{30} + \eta_{12})^2 - 3(\eta_{21} + \eta_{13})^2) + (3\eta_{21} - \eta_{13})(\eta_{21} + \eta_{13})(3(\eta_{30} + \eta_{12})^2 - (\eta_{30} + \eta_{12})^2), \quad (29)$$

$$M_6 = (\eta_{20} - \eta_{02})(\eta_{30} + \eta_{12})^2 - (\eta_{30} + \eta_{12})^2 + 4\eta_{11}(\eta_{30} + \eta_{12})(\eta_{30} + \eta_{12}), \quad (30)$$

$$M_7 = (3\eta_{21} + \eta_{13})(\eta_{30} + \eta_{12})(\eta_{21} + \eta_{30})^2 - 3(\eta_{21} + \eta_{13})^2 + (3\eta_{12} - \eta_{30})(\eta_{21} + \eta_{13})(3(\eta_{30} + \eta_{12})^2 - (\eta_{21} - \eta_{13})^2). \quad (31)$$

4.2 多样本匹配

由于检测零件存在一定厚度, 所以当它处在相机视野的不同位置时, 如图 3 所示, 相机采集的零件轮廓尺寸是不一样的, 采集的零件轮廓存在差异, 并不是完全吻合. 为了避免零件的误检, 需要在不同位置对标准零件采样, 并保留标准样本的 hu 矩参数。

系统中光纤传感器检测到零件时触发相机, 触发相机后零件会固定在相机下方的虚线范围内, 如图 4 所示, 零件可能以不同姿态出现在虚线范围内的不同位置。

将图 4 所示的检测件作为采集标准样本轮廓并计算 hu 矩, 每个零件选择 4 个方向计算 hu 矩, 一共得出 4 个 hu 矩的特征值. 采集零件照片得

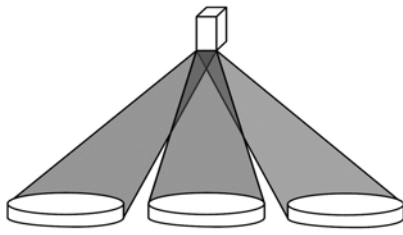


图 3 零件在不同位置采集图

Fig. 3 Images of standard parts in different locations

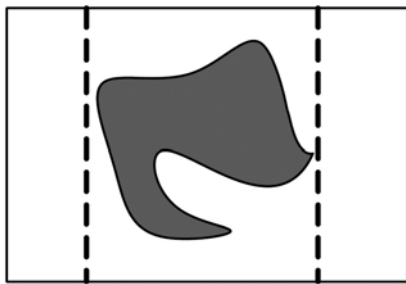


图 4 零件在相机的视野

Fig. 4 Part in field of camera view

出 hu 矩值,与其中任意一个特征值进行匹配,若匹配度大于 98%,或者与每一个的匹配度达到 94%以上,可以断定为合格零件;否则为缺陷零件。采集零件图片如图 5 所示,从左到右分别为零件 1,零件 2,零件 3,零件 4。



图 5 零件的四种姿态

Fig. 5 Image of parts in four postures

表 1 不同姿态的 hu 矩参数

Tab. 1 Hu parameters of parts in different postures

hu 矩	零件 1	零件 2	零件 3	零件 4
M_1	0.218 25	0.218 53	0.218 25	0.218 40
$M_2/(10^{-2})$	0.420 28	0.420 21	0.420 84	0.420 92
$M_3/(10^{-2})$	0.173 11	0.173 17	0.172 61	0.173 75
$M_4/(10^{-3})$	0.214 06	0.212 97	0.214 90	0.212 97
$M_5/(10^{-6})$	-0.128 9	-0.128 2	-0.129 5	-0.128 3
$M_6/(10^{-4})$	-0.127 5	-0.127 1	-0.128 6	-0.126 6
$M_7/(10^{-7})$	0.190 98	0.168 89	0.189 97	0.174 69

表 1 所示为图 5 所示零件对应的 7 个不变矩

参数,零件 1,2,3,4 为 4 种不同姿态。从表 1 可以看出,不同姿态图像对应的不变矩参数基本一致,为了准确地识别工件的缺陷,零件匹配结果可通过比较每一个 hu 矩参数与标准件来判断:

$$\tau = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^7 \frac{M_i}{7M_{bj}} \times 100\%, \quad (32)$$

其中: M_i 为待判断零件的 hu 不变矩的 7 个参数, M_{bj} 为采集的标准件 hu 不变矩参数。

4.3 面积匹配

多数冲压件缺陷集中在边缘,面积相对于标准件有所减小,因此可通过计算轮廓内面积对零件轮廓面积进行匹配。标准件放置在相机视野下的不同位置,采集标准件面积并求出最大与最小的面积差值 φ 。当缺陷件面积大于阈值 φ ,可判断为缺陷件。轮廓面积为:

$$S = \int_{\text{inside}(C)} u(x, y) dx dy, \quad (33)$$

对图 5 中不同姿态的零件进行面积计算,结果如表 2 所示。

表 2 不同姿态零件面积

Tab. 2 Area of parts in different postures

标号	1	2	3	4
S/pixel	66 041	65 987	66 122	66 098

上述测量结果表明,即使是同一个零件,在不同姿态下测得的面积也存在差值,原因是零件存在一定的厚度,采集的轮廓随着位置不同而不同,面积也会有所差异。但是面积匹配有一定的局限性,例如当一个零件的两个部位,一个部位缺陷,另一个冲压不完整,也就是多了一块,如果缺陷和多的部分恰好相等,此时面积匹配不能够准确检测冲压件缺陷,还得依靠轮廓匹配方法。图 6 显示了这种冲压件缺陷。

5 实验与结果

5.1 零件轮廓提取

使用 Chan-Vese 模型提取零件轮廓,其中参数选择为 $\lambda_1 = \lambda_2 = 1, \mu = 0.01 \times 255^2, \epsilon = 1$ 。轮廓提取结果如图 7 所示,其中红色轮廓线为演化曲线,图 7(a)为初始化轮廓,图 7(b)为迭代 150 次得到的轮廓,图 7(c)为迭代 300 次得到的轮廓

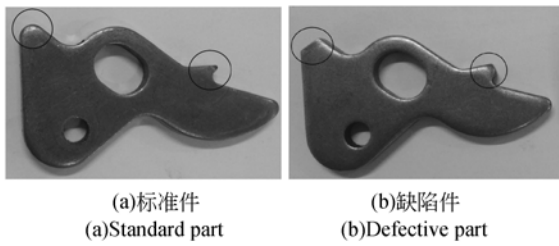


图 6 冲压件缺陷

Fig. 6 Defect of stamping part

(彩图见期刊电子版)。可见,迭代 300 次后能够准确地得到零件轮廓线。

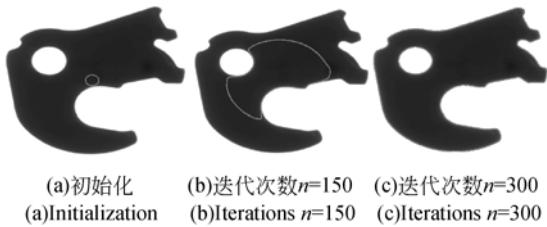


图 7 水平集轮廓迭代次数

Fig. 7 Iterations of contour level set

Chan-Vese 模型是根据图像全局区域演化水平集函数,因此具有抗干扰能力强,区域演化速度快和分割准确等优点。此模型的速度函数和图像梯度无关,适用于图像中无意义的轮廓线检测。对于边界不光滑或者不连续的零件也能够检测出轮廓,如图 8 所示。

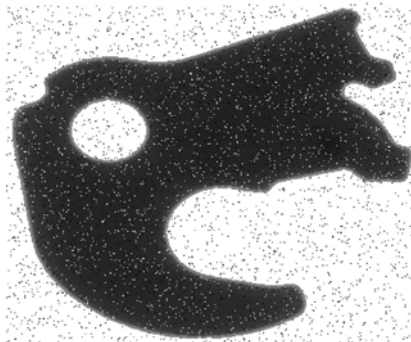


图 8 加入噪声后提取的轮廓

Fig. 8 Extracted contour after adding noise

5.2 冲压件缺陷检测

异形件轮廓视觉检测系统如图 9 所示。对冲压件标件进行采样,记录下标件 hu 矩和面积参

数,设置阈值,其中多样本匹配阈值设为 94.0%,面积阈值设为 300 pixel。测试合格品以及缺陷件 3 种姿态下的 hu 匹配率以及面积匹配平均值,测试结果如表 3 所示。

表 3 Hu 匹配和面积匹配的结果

Tab. 3 Results of hu moment invariant matching and area matching algorithms

	Hu 匹配	Hu 匹配	Hu 匹配	面积匹配
合格品 1	98.7%	99.0%	98.6%	154
合格品 2	99.3%	99.5%	99.2%	166
缺陷 1	88.0%	87.6%	87.6%	653
缺陷 2	88.3%	88.4%	88.4%	805
缺陷 3	90.0%	90.1%	90.8%	625

由表可知,当 hu 匹配率大于阈值 94.0% 并且面积匹配小于面积阈值 300 时,判定冲压件为合格品;当不满足 hu 匹配率阈值或者大于面积阈值时,为缺陷件。



图 9 轮廓视觉检测系统

Fig. 9 Photo of contour vision inspection for irregular stamping parts

6 结 论

本文根据冲压件检测精度高、速度快的要求,提出了异形冲压件缺陷视觉检测方法。首先介绍

了视觉检测系统的结构和工作原理,采用水平集方法以及 Chan-Vese 模型相结合的方法提取轮廓。此方法从全局演化,具有较强抗干扰能力,提取精度高的优点。然后研究了 hu 不变矩方法,利用 hu 不变矩计算得到的 7 个参数计算与标准

件的匹配率。最后,提出一种面积匹配的方法,此方法与 hu 矩匹配方法相结合,提高了缺陷零件的检测准确率。实验结果表明:此检测系统可检测出占整个零件面积 0.5% 以上的缺陷,提高了检测精度,能够满足异形冲压零件缺陷检测的需求。

参考文献:

- [1] WEN Z, CAO J, LIU X, *et al.*. Fabric defects detection using adaptive wavelets [J]. *International Journal of Clothing Science and Technology*, 2014, 26(3): 202-211.
- [2] 陈文志,张凤燕,张然,等. 基于电致发光成像的太阳能电池缺陷检测[J]. *发光学报*, 2013, 34(8): 1028-1034.
CHEN W ZH, ZHANG F Y, ZHANG R. Detection based on electroluminescence imaging solar[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2013, 34(8): 1028-1034. (in Chinese)
- [3] 朱光,朱学芳,张华坤. 复杂背景下 TFT-LCD 表面缺陷检测系统的设计[J]. *电子测量与仪器学报*, 2011, 25(12): 1054-1059.
ZHU G, ZHU X F, ZHANG H K. Design TFT-LCD surface defect detection system in complex background [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrument*, 2011, 25(12): 1054-1059. (in Chinese)
- [4] TING J, HOPPER C. A general approach to defect detection in textured materials using a wavelet domain model and level sets[J]. *SPIE*, 2005, 6001(3): 309-310.
- [5] MARTÍNEZ S S, ORTEGA J G, GARCÍA J G, *et al.*. A machine vision system for defect characterization on transparent parts with non-plane surfaces [J]. *Machine Vision and Applications*, 2012, 23(1): 1-13.
- [6] 廖建军. 基于计算机视觉的石材轮廓提取及缺陷检测[D]. 沈阳:沈阳建筑大学, 2013.
LIAO J J. *Stone Contour Extraction and Defect Detection Based on Computer Vision*[D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University, 2013. (in Chinese)
- [7] 郭庆华,刘海霞,宋丽梅,等. 显微镜镜头的圆弧表面缺陷检测[J]. *光学精密工程*, 23(10z): 790-797.
GUO Q H, LIU H X, SONG L M, *et al.*. Detection of arc surface defects in microscope lens detection system[J]. *Opt. Precision Eng.*, 23(10z): 790-797. (in Chinese)
- [8] 刘慧英,王小波. 基于 OpenCV 的车辆轮廓检测[J]. *科学技术与工程*, 2010, 10(12): 2987-2991.
LIU H Y, WANG X B. The vehicle's contour detection based on OpenCV [J]. *Science Technology and Engineering*, 2010, 10(12): 2987-2991. (in Chinese)
- [9] 龚永义,罗笑南,黄辉,等. 基于单水平集的多目标轮廓提取[J]. *计算机学报*, 2007, 30(1): 120-128.
GONG Y Y, LUO X N, HUANG H, *et al.*. Multi-objects extracted based on single level set[J]. *Chinese Journal of Computers*, 2007, 30(1): 120: 128. (in Chinese)
- [10] CHEN Y T, TSENG D C. Medical image segmentation based on the Bayesian level set method[J]. *Medical Imaging and Informatics*, 2007, 4987: 25-34.
- [11] 刘建磊,隋青美,朱文兴. 结合概率密度函数和主动轮廓模型的磁共振图像分割[J]. *光学精密工程*, 2014, 22(12): 3435-3443.
LIU J L, SUI Q M, ZHU W X. MR image segmentation based on probability density function and active contour model [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(12): 3435-3443. (in Chinese)
- [12] ABDELSAMEA M M, GNECCO G, GABER M M. A SOM-based Chan-Vese model for unsupervised image segmentation [J]. *Soft Computing*, 2015: 1-21.
- [13] DUAN Y, CHANG H, TAI X C. Convergent non-overlapping domain decomposition methods for variational image segmentation [J]. *Journal of Scientific Computing*, 2016: 1-24.
- [14] 汤继生. 图像不变矩的研究及应用[D]. 泉州:华侨大学, 2012.
TANG J SH. *Research and Application of Image Moment Invariants*[D]. Quanzhou: Huaqiao University, 2012. (in Chinese)
- [15] 王晶,何冰. Hu 新增不变矩在零水印中的应用 [J]. *计算机与数字工程*, 2011, 39(1): 125-128.

WANG J, HE B. Application of new Hu invariant moments in zero digital watermarking[J]. *Com-*

puter and Digital Engineering, 2011, 39(1): 125-128. (in Chinese)

作者简介:



陈海永(1980—),男,河南开封人,博士,副教授,2002年、2005年于哈尔滨理工大学分别获得学士、硕士学位,2008年于中国科学院获得博士学位,主要从事机器人视觉,机器人控制等工作。E-mail: haiyong. chen @ hebut. edu. cn



李泽楠(1989—),男,河北邯郸人,硕士研究生,2014年于河北工业大学获得学士学位,主要研究方向为激光焊接、模式识别与图像处理。E-mail: 1017744300@qq. com