

DOI: 10. 13382/j. jemi. B2003541

薄壁零件复杂光照情况下的轮廓特征识别*

毛向向¹ 王红军^{1,2,3}

(1. 北京信息科技大学 机电工程学院 北京 100192; 2. 高端装备智能感知与控制北京市国际科技合作基地 北京 100192; 3. 北京信息科技大学 现代测控技术教育部重点实验室 北京 100192)

摘 要:针对工业生产线薄壁零件识别中存在的零件轮廓识别受光照影响较大的问题,将颜色恒常性技术应用到工业生产线轮廓识别中,基于 Retinex、HSI 及边缘检测算法的基本原理,提出了一种薄壁零件复杂光照情况下的轮廓特征识别算法用于薄壁零件的图像恢复和轮廓识别。该方法首先使用 HSI 颜色空间对图像的亮度进行提取,然后利用改进 Retinex 算法来对获取的零件图像进行自适应图像增强,滤除图像中的光照变化信息,之后在此基础上对图像进行灰度化处理,最后采用 Canny 算法识别薄壁零件的边缘,进一步提取薄壁零件的有效轮廓特征。实验结果表明:该算法能够快速、准确地识别复杂光照情况下的薄壁零件的轮廓信息,满足工业流水线检测的需求。

关键词:轮廓识别;Retinex;薄壁零件;Canny 算法

中图分类号: TH212;TH213. 3 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510. 40

Improved retinex and edge detection fusion of thin-walled complex part contour recognition algorithm

Mao Xiangxiang¹ Wang Hongjun^{1,2,3}

(1. School of Mechanical Electrical Engineering, Beijing Information Science & Technology University, Beijing 100192, China;
2. Beijing International Science Cooperation Base of High-End Equipment Intelligent Perception and Control, Beijing 100192, China;
3. Key Laboratory of Modern Measurement & Control Technology, Ministry of Education, Beijing Information Science & Technology University, Beijing 100192, China)

Abstract:Aiming at the problem that part contour recognition in the recognition of thin-walled parts in industrial production lines is greatly affected by light, the color constancy technology is applied to the contour recognition of industrial production lines. Based on the basic principles of Retinex, HSI and edge detection algorithms, a contour feature recognition algorithm for thin-walled parts under complex lighting conditions is proposed for image restoration and contour recognition of thin-walled parts. First, the method uses HSI color space to extract the brightness of the image. Then the improved Retinex algorithm is used to perform adaptive image enhancement on the acquired part image and the light change information in the image is filtered out. Then the image is grayed out on this basis. Finally, the Canny algorithm is used to identify the edges of thin-walled parts, and the valid outline features of thin-walled parts are further extracted. Experimental results show that the algorithm can quickly and accurately identify the outline information of thin-walled parts under complex lighting conditions, and meet the needs of industrial assembly line inspection.

Keywords:contour recognition; Retinex; thin-walled parts; Canny algorithm

0 引 言

薄壁零件的侧壁一般非常薄,在 1 mm 以内,多为金

属材料制成,具有密度低、结构紧凑、承载性强等特点^[1-2],被广泛应用于航天、国防等领域。但是,薄壁零件刚性差、强度低,受热易变形,在加工过程中极易发生变形。组合型薄壁零件甚至由多个薄壁零件呈阵列装配组

和而成,形状复杂,任何一个薄壁零件的外轮廓尺寸误差过大都会导致装配失败。因此,需要对薄壁零件的外轮廓边缘信息进行精确提取。

传统薄壁零件的轮廓检测及装配还是主要依靠人工,装配周期长,合格率低,极大影响了零件装配效率和质量。机器视觉技术凭借其自身效率与精度均显著高于人工的特点,使机器人摆脱了“盲装配”的阶段,实现了装配的柔性化,基于视觉引导的柔性化装配技术成为解决薄壁零件轮廓检测瓶颈的有效手段。

目前针对轮廓识别,国内外科研人员已经提出了一些新的检测方法。Liu 等^[3]通过粗提取与精提取相结合的方法,在滤除冗余数据的同时精确获取轮廓特征点。Manno-Kovacs 等^[4]提出一种显著的目标提取方法,根据边缘特征点的方向信息进行选择性边缘提取,获得高精度形状轮廓。Jin 等^[5]利用改进 Canny 算法与 vibe 算法来对目标进行识别,通过前景模型与边缘信息结合得到更加准确的轮廓特征。Ai 等^[6]提出了一种 Canny 边缘图辅助下的边界轮廓检测方法,能够有效识别环境中物体的轮廓信息。许鑫杰等^[7]利用 Canny 边缘检测算法提取出零件的边缘轮廓的相关特征,在保证检测效率和准确性的同时进一步降低了检测装置的成本,达到了快速、准确识别目标零件的工业流水线检测要求。但是他们都是在保证良好照明的条件下对零件轮廓进行识别,没有考虑外界环境光照变化对零件轮廓识别的影响。目前实际工业生产线中普遍采用灯箱的方式来隔绝外界环境中的光照并对目标零件进行均匀投光来获得理想的图像信息,无形中大大增加了生产的成本。

针对这一问题,提出薄壁零件复杂光照情况下的轮廓特征识别,该方法有效滤除了外界光照变化对零件识别的影响,不需要再增加额外的遮光装置,具有更好的鲁棒性,能从不同的光照影响中快速准确地提取出薄壁零件轮廓边缘信息。

1 薄壁零件轮廓识别算法

1.1 算法整体结构

本文所涉及的识别算法主要包括融合 HIS 颜色空间的 Retinex 算法、亮度自适应调整算法及 Canny 边缘检测算法。

本文算法流程如图 1 所示,首先将彩色摄像头获取的彩色图像信息分为 R、G、B 三个分量,分别对各通道分量进行计算并转换到 HIS 颜色空间,得到图像的色调(H)、饱和度(S)及亮度(I)信息。其次,在保证色调不变得到情况下根据 I 的不同进行图像分类,亮度过高的图像利用亮度调整算法进行亮度降低,亮度过低的图像通过 Retinex 算法进行图像增强。然后,将处理后的彩色

图像再转换回 RGB 颜色空间,根据分量法对图像进行灰度处理,滤除彩色信息,初步获取轮廓信息。最后,采用 Canny 算法对图像的轮廓边缘进行识别,提取有效的轮廓特征。

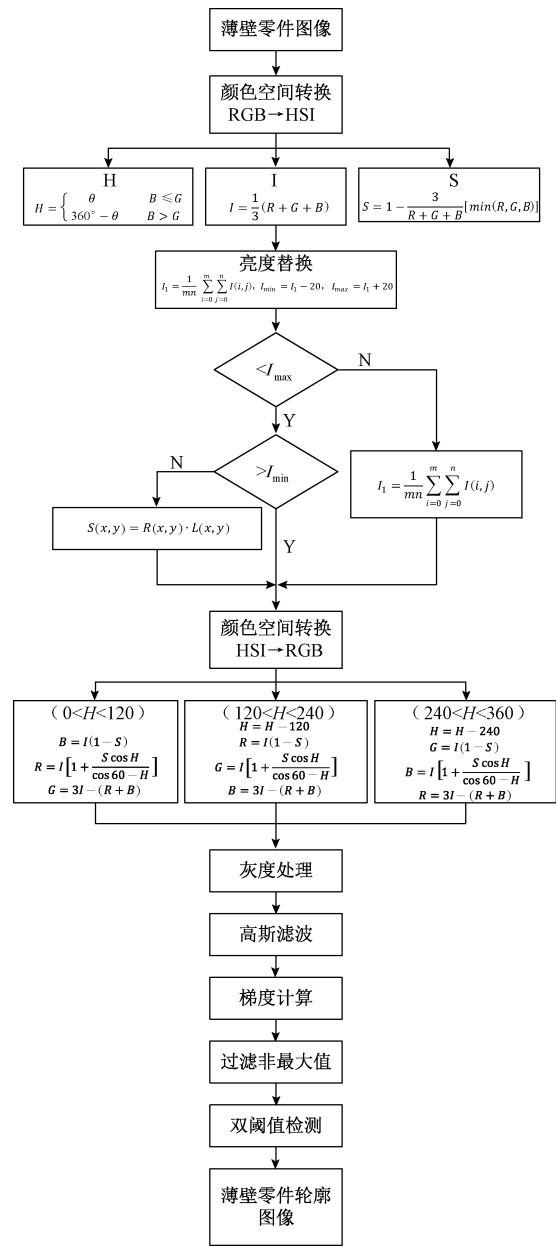


图 1 本文算法流程

Fig. 1 Flowchart of the algorithm

1.2 改进 Retinex 算法

1) Retinex 算法

Retinex 是 1963 年提出的一种基于实验及分析的图像增强算法^[8]。相较于传统的图像处理方法,该算法是基于颜色一致性对图像进行色彩恢复,而不是仅仅增强图像某一种特征,可以在动态范围压缩、轮廓特征增强和

颜色保真三方面达到平衡,因而可以在复杂环境中针对薄壁零件轮廓进行特征增强,滤除光照变化对图像识别的影响。

Retinex 的理论表达式^[9]如下:

$$S(x, y) = R(x, y) \cdot L(x, y) \quad (1)$$

式中: $S(x, y)$ 为摄像机接收到的薄壁零件图像; $R(x, y)$ 为薄壁零件的反射图像; $L(x, y)$ 为光照的亮度信息; (x, y) 为薄壁零件图像中的任意一点的坐标。

Retinex 理论是基于某种方法滤除光照亮度信息 $L(x, y)$ 的影响,尽可能让摄像头直接接收到薄壁零件反射图像 $R(x, y)$, 其基本的处理过程如图 2 所示。

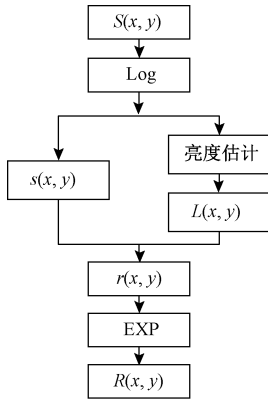


图 2 Retinex 基本处理过程

Fig. 2 Retinex basic process

根据图 1 可知:

$$\begin{cases} r(x, y) = \log R(x, y) = \log \frac{S(x, y)}{L(x, y)} \\ r(x, y) = \log S(x, y) - \log [F(x, y) * S(x, y)] \\ F(x, y) = \lambda e^{\frac{-(x^2 + y^2)}{c^2}} \end{cases} \quad (2)$$

式中: $r(x, y)$ 为指数域薄壁零件图像; $*$ 为卷积标记; $F(x, y)$ 为环绕函数; C 为高斯环绕尺度; λ 为归一化常数,且满足 $\iint F(x, y) dx dy = 1$ 。

为了保持薄壁零件图像颜色真实性和动态范围转化,将 RGB 三个颜色通道的值进行赋权求和,得到多尺度 Retinex 算法 (multi scale retinex, MSR), 计算公式如下:

$$r_M(x, y) = \sum_{j=1}^N w_j r(x, y) \quad (3)$$

式中: $r_M(x, y)$ 为多尺度输出指数域薄壁零件图像; N 为颜色通道数; w_j 为权重系数, $w_1 = w_2 = w_3 = \frac{1}{3}$; $F_j(x, y)$ 为第 j 个环绕函数。

$$F_j(x, y) = K \exp \left[\frac{-(x^2 + y^2)}{2\sigma_j^2} \right] \quad (4)$$

式中: σ_j 为第 j 个环绕函数的尺度参数,其大小决定着增强图像的效果。 σ_j 越小,薄壁零件图像光照不足部分的轮廓恢复效果越好,但是颜色一致性越差; σ_j 越大,薄壁零件图像的颜色一致性越强,但是局部轮廓细节恢复越

差, K 为归一化参数,且满足 $K = \frac{1}{\sum_x \sum_y F(x, y)}$ 。

但是多尺度 Retinex 算法在图像增强的同时也增加了噪声,导致图像中的局部区域颜色失真,为了解决这一问题,加入颜色恢复参数 C 对颜色恢复效果进行改善,得到彩色恢复多尺度 Retinex 算法 (multi scale retinex with color restore, MSRCR), 计算公式如下:

$$\begin{aligned} r_c &= C_i(x, y) r_M(x, y) \\ C_i(x, y) &= \alpha \log \left[\frac{A \cdot S_i(x, y)}{\sum_{i=1}^N S_i(x, y)} \right] \end{aligned} \quad (5)$$

式中: $C_i(x, y)$ 表示第 i 个通道的颜色恢复参数;为保证颜色恢复参数为正数,用 $\log(x + 1)$ 来替换 $\log(x)$ 。

$$C_i(x, y) = \alpha \log \left[\frac{1 + A \cdot S_i(x, y)}{\sum_{i=1}^N S_i(x, y)} \right] \quad (6)$$

2) 改进 Retinex 算法

一般情况下,彩色摄像机采集到的薄壁零件图像为不同光照情况下的 RGB 图像,RGB 颜色空间中两种颜色之间的差异不能用距离表示,只能通过 R、G、B 三个通道的颜色进行不同比例的混合来产生各种颜色,且光照情况的不同也会对薄壁零件的颜色产生影响,任何一个因素发生变化都会造成颜色的改变。通过 MSRCR 算法对 RGB 图像进行增强时忽略了 3 个通道之间的关系,无法保证颜色的真实性,且仅仅对光照不足的薄壁零件图像恢复效果较好,光照强度较大的情况下处理效果不佳,如图 3 所示。

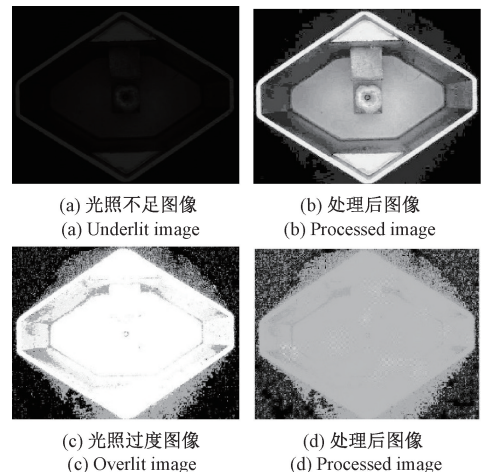


图 3 不同光照情况下 MSRCR 算法处理效果

Fig. 3 MSRCR algorithm processing effect under different lighting conditions

为了解决有效区分不同维度信息的问题,引入 HSI 颜色空间,其通常表示为双圆锥模型^[10],通过坐标可以准确地表示不同颜色之间的区别,更适合于薄壁零件图像的恢复,同时也是与人类视觉系统最相似的颜色空间,如图 4 所示。

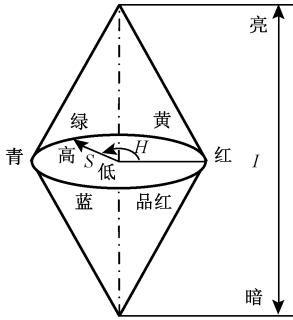


图 4 HSI 颜色空间
Fig. 4 HIS Color Space

该模型将颜色分解成 H 、 S 和 I 三部分, H 和 S 是对薄壁零件颜色差异的描述, I 是对光照强度的描述, I 的调整不会对目标颜色造成影响, 导致颜色失真, 能够有效增强图像识别对光照变化的鲁棒性。

RGB 颜色空间与 HSI 颜色空间的转换公式如下:

$$\begin{aligned} H &= \begin{cases} \theta, B \leq G \\ 360^\circ - \theta, B > G \end{cases} \\ S &= 1 - \frac{3}{R + G + B} [\min(R, G, B)] \\ I &= \frac{1}{3} (R + G + B) \end{aligned} \tag{7}$$

其中, $\theta = \cos^{-1} \left\{ \frac{\frac{1}{2} [(R-G) + (R-B)]}{[(R-G)^2 + (R-B)(G-B)]^{\frac{1}{2}}} \right\}$ 。

为了解决光照强度较大的情况下图像恢复效果不佳的问题,利用亮度自适应调整算法对光照过度的图像进行调整优化。

首先获取理想光照条件下的薄壁零件图像的平均亮度值 I_1 , 然后以 I_1 为中心确定薄壁零件图像的理想亮度值范围,即确定最大亮度值 I_{\max} 及最小亮度值 I_{\min} ,最后对亮度值大于 I_{\max} 的图像进行亮度值进行自适应调整,亮度值小于 I_{\min} 的图像进行图像恢复。计算公式如下:

$$\begin{aligned} I_1 &= \frac{1}{mn} \sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n I(i, j) \\ I_{\min} &= I_1 - 20 \\ I_{\max} &= I_1 + 20 \end{aligned} \tag{8}$$

增加亮度自适应调整算法后的改进 Retinex 算法,在光照过度的情况下对获取的薄壁零件图像进行自适应亮度调整,降低了图像轮廓周边的白光噪声对轮廓的影响,

图像识别效果得到了进一步的提升。改进 Retinex 算法在复杂光照情况下均能对薄壁零件图像进行色彩恢复,增强轮廓边缘信息,得到较好的薄壁零件图像恢复效果,如图 5 所示。

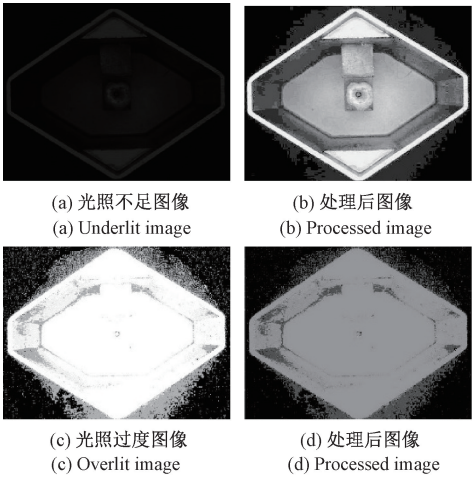


图 5 不同光照情况下改进 Retinex 算法处理效果
Fig. 5 Improved processing effect of Retinex algorithm under different lighting conditions

HSI 颜色空间能够非常直观地描述自然界中的颜色,有效的分离图像的不同维度信息,并能降低处理彩色图像的复杂程度,提高图像处理效率,为各种图像处理算法提供了更加方便的环境。该空间的三个通道各自独立、互不干涉,可以在不改变颜色的情况下,对图像的亮度信息进行调整,根据亮度信息的不同,选择不同的算法进行处理,得到更加清晰的轮廓信息。

1.3 Canny 边缘检测算法

经过改进 Retinex 算法对图像进行图像增强之后,需要对图像的轮廓进行识别, Canny 算法是一个寻找最优的多级边缘检测算法^[11-13],在低误判概率、高定位精度以及单边缘响应的 3 个最优准则下,相比于其他算法能够有效滤除环境中的复杂噪声,快速有效提取边缘信息。

Canny 边缘检测的具体步骤如下^[14-15]。

1) 滤波过程,对灰度图像进行高斯模糊处理,通过高斯滤波去除高频伪边缘对图像轮廓边缘识别的影响。高斯滤波的公式如下:

$$G(x, y) = \frac{1}{2\pi\delta^2} \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{2\delta^2}\right) \tag{9}$$

$$f_1(x, y) = G(x, y)f_0(x, y)$$

式中: $G(x, y)$ 为高斯函数; $f_0(x, y)$ 为原始灰度图像; $f_1(x, y)$ 为平滑图像;

2) 计算梯度幅值和方向,利用像素点 (x, y) 的邻域计算图像边缘 0° 、 45° 、 90° 及 135° 方向的偏导数,计算公

式如下:

$$G_x(i,j) = G(i+1,j) - G(i-1,j)$$

$$G_y(i,j) = G(i,j+1) - G(i,j-1)$$

总梯度幅值 $G(i,j)$ 计算公式如下:

$$G(i,j) = \sqrt{G_x^2(i,j) + G_y^2(i,j)}$$

总梯度的方向 θ 计算公式如下:

$$\theta(i,j) = \arctan\left(\frac{G_x(i,j)}{G_y(i,j)}\right)$$

3) 过滤非最大梯度强度值,为了将模糊边缘细化清晰,需对非边缘点进行滤除,在已提取出的轮廓边缘像素点中保留局部梯度强度最大点,将非局部梯度强度最大点赋值为 0,得到更加精确的边缘轮廓。

4) 双阈值检测和边缘处理,根据图像的梯度累计直方图计算上下两个阈值,图像中像素点的梯度强度高于上阈值则为轮廓边缘,低于下阈值则为非轮廓边缘,介于两者之间的需再次检测其周围 8 个像素点,只要有一个像素点为轮廓边缘,则该点为轮廓边缘。

2 某薄壁零件的实际测试结果与分析

选择某薄壁零件对算法模型进行实际测试,薄壁零件示意图如图 6 所示。

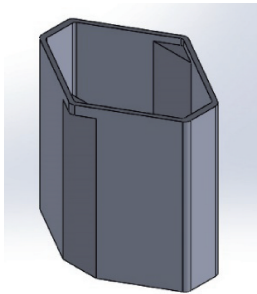


图 6 薄壁零件示意图

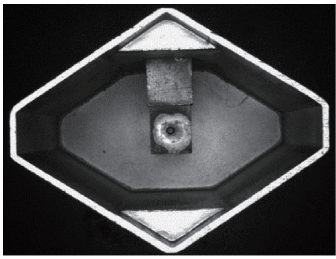
Fig. 6 Schematic diagram of thin-walled parts

采用传统的轮廓识别算法对该薄壁零件进行识别时,轮廓的识别精度受光照强度的影响十分严重,在非理想光照情况下,无法精确提取出薄壁零件的轮廓信息。

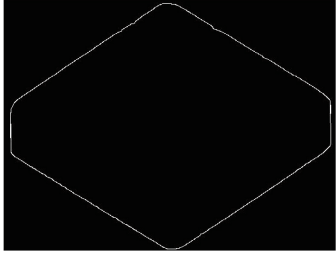
假设薄壁零件的光照强度为理想光照、光照严重不足、光照严重过度 3 种情况,采用 MATLAB 进行测试,与传统边缘检测算法相比,提出的算法模型对光照的鲁棒性更强。

2.1 理想光照情况下

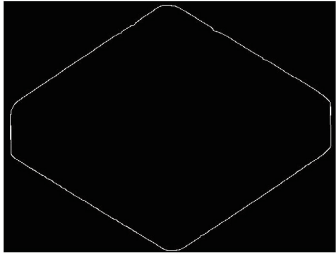
理想光照情况下,输入原始图像如 7(a) 所示,轮廓清晰,与背景色差明显,传统边缘检测算法和本文算法均能准确识别出零件轮廓特征,结果如图 7(b) 和 (c) 所示。



(a) 输入原始图像
(a) Input original image



(b) 传统边缘检测算法
(b) Traditional edge detection algorithm



(c) 本文算法
(c) Proposed algorithm

图 7 理想光照情况下测试结果

Fig. 7 Test results under ideal lighting conditions

2.2 光照严重不足情况下

当光照严重不足时,输入原始图像如 8(a) 所示,与背景色差极小,边缘轮廓十分模糊,传统边缘检测方法无法提取出零件的轮廓特征信息,而本文算法依然能够准确提取出零件的轮廓边缘特征,结果如图 8(b) 和 (c) 所示。

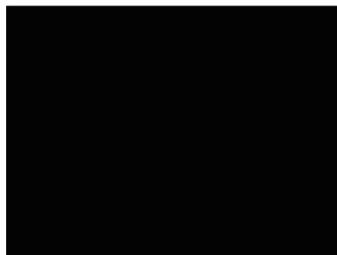
2.3 光照严重过度情况下

当光照严重过度时,输入原始图像如 9(a) 所示,轮廓边缘出现大量噪声,导致图像的边缘局部模糊不清,传统边缘检测算法无法准确的识别出零件的轮廓特征,边缘变形严重并且出现大量伪边缘,而本文算法能够明显滤除光照噪声的影响,准确识别出零件轮廓特征信息,结果如图 9(b) 和 (c) 所示。

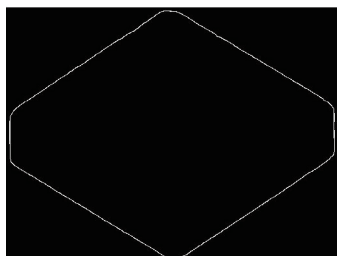
由上述 3 种具有代表性的光照环境下薄壁零件轮廓提取的对比测试结果可知,复杂光照情况下的轮廓特征识别方法在各种复杂光照环境中均能准确提取出薄壁零件的轮廓边缘特征,对光照的变化具有较强的鲁棒性。



(a) 输入原始图像
(a) Input original image



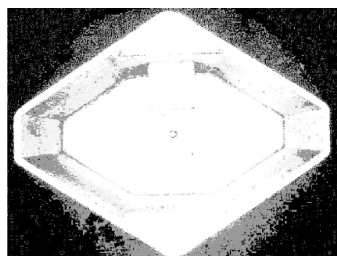
(b) 传统边缘检测算法
(b) Traditional edge detection algorithm



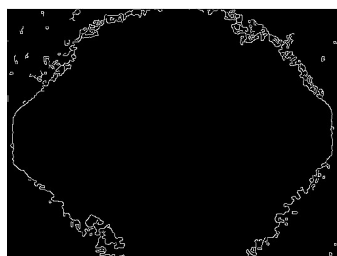
(c) 本文算法
(c) Proposed algorithm

图 8 光照严重不足情况下测试结果

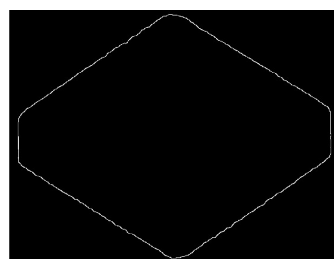
Fig. 8 Test results under severely insufficient light



(a) 输入原始图像
(a) Input original image



(b) 传统边缘检测算法
(b) Traditional edge detection algorithm



(c) 本文算法
(c) Proposed algorithm

图 9 光照严重过度情况下测试结果

Fig. 9 Test results under severe excessive light

3 结 论

针对传统生产线中光照变化对薄壁零件轮廓识别具有较大影响的问题,提出了一种复杂光照情况下的轮廓特征识别方法,该方法包括颜色空间转换、图像自适应增强、轮廓提取等几个处理步骤,由于对在图像自适应增强的步骤中设计了一种图像自适应轮廓增强的方案,因此该算法对光照的变化具有较强的鲁棒性。实验结果表明,该算法相对于传统边缘检测算法,在光照严重不足、光照严重过度等极端情况下,依然能够更准确的识别出零件轮廓特征,能够满足实际工业生产线中光照变化情况下薄壁零件的快速、准确轮廓识别需求。

参考文献

- [1] 王景梅. 薄壁零件热处理变形工艺优化研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2012.
WANG J M. Study on optimization of heat treatment deformation process of thin-wall parts [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2012.
- [2] 徐文才, 郎利辉, 黄西娜, 等. 铝合金复杂薄壁件热等静压成形数值模拟[J]. 锻压技术, 2019, 44(6): 65-72.
XU W C, LANG L H, HUANG X N, et al. Numerical simulation of hot isostatic forming of complex thin-walled aluminum alloy parts [J]. Forging Technology, 2019, 44(6): 65-72.
- [3] LIU G S, LI B L. Extraction of optimal contour dominant points based on ICT images in reverse engineering [J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 2746: 2570-2575.
- [4] ANDREA M K. Direction selective contour detection for salient objects [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2018, 29(2): 375-389.
- [5] JIN D L, ZHU S H, SUN X. Fusing Canny operator with vibe algorithm for target detection [C]. Chinese Control

- and Decision Conference, 2016.
- [6] AI K, CAO Z Q, LIU X L, et al. A contour detection approach for mobile robot [C]. International Conference on Intelligent Robotics and Applications, 2014.
- [7] 许鑫杰,王秀峰,鲁文其,等. 基于边缘检测的零件轮廓识别系统开发[J]. 机电工程, 2019, 36(2): 201-205.
- XU X J, WANG X F, LU W Q, et al. Development of part contour recognition system based on edge detection [J]. Mechanical and Electrical Engineering, 2019, 36(2): 201-205.
- [8] LISANI J L, MOREL J M, PETRO A B, et al. Lightness and retinex theory [J]. Information Sciences, 2020, 512: 741-759.
- [9] 王伟江,彭业萍,曹广忠,等. 面向机柜表面缺陷检测的不均匀光照和低亮度图像增强方法[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(8): 131-139.
- WANG W J, PENG Y P, CAO G ZH, et al. Uneven illumination and low-brightness image enhancement method for cabinet surface defect detection [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(8): 131-139.
- [10] 吴一全,刘莉. 基于视觉的车道线检测方法研究进展[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(12): 92-109.
- WU Y Q, LIU L. Research progress of lane line detection based on vision [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(12): 92-109.
- [11] 李俊晖,石守东,谢志军,等. 基于边缘重建的双绞线绞距实时检测方法[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(6): 86-95.
- LI J H, SHI SH D, XIE ZH J, et al. A real-time detection method for twisted-pair stranded distance based on edge reconstruction [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(6): 86-95.
- [12] 张喜民,余奇颖,张金博,等. 基于机器视觉的手机尾插件精密测量方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(10): 47-54.
- ZHANG X M, YU Q Y, ZHANG J B, et al. Research on precision measurement method of mobile phone tail plug based on machine vision [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(10): 47-54.
- [13] 梁肇峻,钟俊. 基于 Otsu 算法与直方图分析的自适应 Canny 算法的改进[J]. 现代电子技术, 2019, 42(11): 54-58.
- LIANG ZH J, ZHONG J. Improvement of adaptive Canny algorithm based on Otsu algorithm and histogram analysis [J]. Modern Electronic Technology, 2019, 42(11): 54-58.
- [14] 李莉,王绪国. 局部二值模式耦合双阈值 LM 优化的火焰图像边缘检测算法[J]. 电子测量与仪器学报, 2019, 33(6): 9-17.
- LI L, WANG X G. Flame image edge detection algorithm based on local binary mode coupled with Double threshold LM optimization [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2019, 33(6): 9-17.
- [15] 何静,余昊宇,张昌凡,等. 基于 Canny-YOLOv3 的列车轮对踏面损伤检测[J]. 电子测量与仪器学报, 2019, 33(12): 25-30.
- HE J, YU H Y, ZHANG CH F, et al. Canny-YOLOv3 based detection of wheelset tread damage in trains [J]. Chinese Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2019, 33(12): 25-30.

作者简介



毛向向, 2014 年于北京信息科技大学获得学士学位, 现为北京信息科技大学硕士研究生, 主要研究方向为智能制造、并联机器人。

E-mail: 1031364726@qq.com

Mao Xiangxiang received his B. Sc. degree in 2014 from Beijing Information Science and Technology University. Now he is a M. Sc. candidate at Beijing Information Science and Technology University. His main research interests include intelligent manufacturing, parallel robot.



王红军 (通信作者), 2005 年于北京理工大学获得博士学位, 现为北京信息科技大学教授, 主要研究方向为高端装备智能感知与控制、故障诊断与智能运维。

E-mail: wanghj86@163.com

Wang Hongjun (Corresponding author) received her Ph. D. degree from Beijing Institute of Technology in 2005. Now she is a professor at Beijing Information Science and Technology University. Her main research interests include high-end equipment intelligent perception and control, fault diagnosis and intelligent operation and maintenance.