

薄板小间隙对接焊焊缝特征点的识别

孟祥超^{1,2}, 孙有平^{1,2,3}, 何江美^{1,2,3}, 杨春洋^{1,2}

(1. 广西科技大学机械与交通工程学院, 广西 柳州 545006; 2. 广西土方机械协同创新中心, 广西 柳州 545006;
3. 广西汽车零部件与整车技术重点实验室, 广西 柳州 545006)

摘要:针对薄板小间隙对接焊焊缝特征点检测问题,应用了一种基于Labview的Shi-Tomasi角点检测算法,根据线激光照射到焊缝表面形成间断的激光条纹,采用图像预处理以及图像形态学变换的方法得到便于进行焊缝角点检测的焊缝图像,然后运用Shi-Tomasi角点检测法对焊缝图像进行角点检测,从而确定出焊缝特征点的位置。通过Labview进行了焊缝特征点识别程序的编写,并在厚度为2mm,焊缝间隙分别为0.3mm、0.4mm、0.5mm、0.6mm的铝合金薄板上进行了特征点识别检测,误差范围不超过0.15mm。结果表明,Shi-Tomasi角点检测算法相较于传统角点检测算法可以更加快速准确的提取到焊缝特征点的位置。

关键词:薄板小间隙; 对接焊缝; Labview; 特征点; Shi-Tomasi角点检测

中图分类号: TH16; TG409 文献标识码: A 文章编号: 1001-3997(2024)10-0048-05

Identification of Feature Points of Small Gap Butt Welding of Thin Plate

MENG Xiang-chao^{1,2}, SUN You-ping^{1,2,3}, HE Jiang-mei^{1,2,3}, YANG Chun-yang^{1,2}

(1. School of Mechanical and Transportation Engineering, Guangxi University of Science and Technology, Guangxi Liuzhou 545006, China; 2. Guangxi Earthmoving Machinery Collaborative Innovation Center, Guangxi Liuzhou 545006, China; 3. Guangxi Key Laboratory of Automobile Components and Vehicle Technology, Guangxi University of Science and Technology, Guangxi Liuzhou 545006, China)

Abstract: Aiming at the problem of detection of weld feature points in small gap butt welding of thin plate, a Shi-Tomasi corner detection algorithm based on Labview was applied. According to the line laser irradiation on the weld surface, discontinuous laser stripes were formed. Image preprocessing and image morphology transformation were used to obtain the weld image which was convenient for detection of weld corner points. Then Shi-Tomasi corner detection method is used to detect the corner points of the weld image, so as to determine the position of the characteristic points of the weld. The program of weld feature points identification was programmed by Labview, and the identification and detection of feature points were carried out on the aluminum alloy sheet with the thickness of 2mm and the weld gap of 0.3mm, 0.4mm, 0.5mm and 0.6mm respectively. The error range was less than 0.15mm. The results show that the Shi-Tomasi corner detection algorithm can extract the position of the weld feature points more quickly and accurately than the traditional corner detection algorithm.

Key Words: Small Gaps in Thin Plates; Butt Weld; Labview; Feature Points; Shi-Tomasi Corner Detection

1 引言

随着制造业水平的发展,焊接技术在制造业中的地位也逐步攀升。目前,工业生产中常用的焊接机器人大多为示教再现型机器人^[1],当焊接工件更换时,需要对机器人焊接轨迹进行重新编程,当面临一些焊接轨迹较复杂的工件,示教在线型机器人的焊接质量与效率则不能满足使用要求。激光视觉传感焊缝跟踪技术具有无接触、速度快、精度高等优点,是实现焊接自动化、智能

化的关键^[2]。由于薄板小间隙焊缝处激光条纹特征形变不明显、存在反光、噪声点较多的现象,导致焊缝特征点的识别较困难,进而给焊缝跟踪的实现带来了一定的难度,对于薄板小间隙对接焊,提高焊缝特征点的识别是提高焊缝跟踪精度的关键所在。近年来,一些学者对薄板对接焊做了一定的研究,并取得了较好的成果,如文献^[3]采用了一种基于灰度梯度重心法进行亚像素的焊缝特征提取,有效的获得了薄板对接焊的焊缝特征,文献^[4]采用

来稿日期: 2023-08-10

基金项目: 柳州市科技计划项目(2021CBA0102); 广西研究生教育创新计划项目(YCSW2021323)

作者简介: 孟祥超, (1997-), 男, 河南南阳人, 硕士研究生, 主要研究方向: 机器学习、焊接自动化;

孙有平, (1979-), 男, 吉林松原人, 博士研究生, 教授, 主要研究方向: 金属材料先进成形理论研究

二阶差分法和极值搜索法得到薄板对接焊缝特征。文献^[5]利用列搜索和距离差分法实现了薄钢板搭接焊特征的识别。本研究通过图像处理方法对照射到焊缝表面的激光条纹进行图像预处理获得经滤波后的背景与前景相分离的激光条纹,然后采用图像形态学算法对激光条纹进行增强处理,针对薄板小间隙焊缝特征点识别问题,采用基于 Labview 的 Shi-Tomasi 角点检测算法,通过该方法可以快速准确的获得焊缝特征位置信息,进而实现焊缝跟踪。

2 焊缝跟踪传感系统

焊缝跟踪传感系统主要由焊接机器人本体、控制柜、焊接电源、计算机和激光视觉传感器组成,如图 1 所示。其中,激光视觉传感器由 CCD 相机、一字型线激光和窄带滤光片组成。CCD 相机垂直于工件进行安装,一字型线激光与 CCD 相机成 30°角安装,窄带滤光片安装于 CCD 镜头前可以预先滤除一部分噪声干扰。

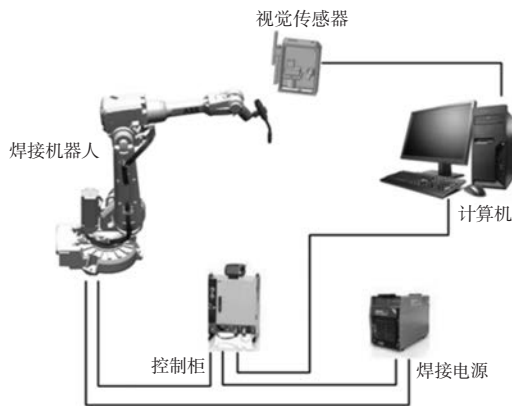


图 1 焊缝跟踪传感系统

Fig.1 Weld Tracking and Sensing System

整个系统的工作流程为:首先,调整焊接机器人合适的焊接高度,确保焊接区域处于激光视觉传感器视野中,由安装在焊接机器人焊枪末端的激光视觉传感器采集到焊缝图像,然后,图像处理系统进行焊缝图像的预处理,经预处理之后的图像已经去除了大部分的噪声干扰,在预处理的基础上进行图像后处理,这时可以得到较为清晰的焊缝特征图像,之后,采用 Shi-Tomasi 角点检测算法得到焊缝特征点位置坐标,将视觉传感器和机器人之间进行标定后的结果由上位机通过 TCP/IP 通讯传给焊接机器人,焊接机器人接收到焊缝特征点位置信息后进行焊接作业。

3 焊缝图像处理

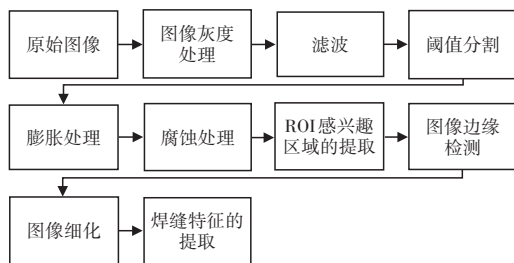


图 2 焊缝图像处理流程

Fig.2 Weld Image Processing Flow

焊接过程中产生的弧光、飞溅等都会影响到焊缝特征点的识

别^[6]。因此需要首先对焊缝图像进行图像处理,这也会直接影响到后续焊缝特征点的识别。这里焊缝图像的处理是基于 Labview 软件实现,Labview 软件中包含了视觉与运动模块,可以很方便的调用所需的图像处理算法。经过实验与分析,确定了整个焊缝图像的处理流程,如图 2 所示。

3.1 焊缝图像预处理

由于所使用的 CCD 相机为彩色相机,采集的焊缝图像为彩色图像,如图 3(a)所示。直接进行彩色图像的处理往往会增加图像处理的原始数据量,减慢图像处理的速度,从而影响焊缝图像处理的实时性,故需要将采集的焊缝图像进行灰度化处理。灰度化处理后的焊缝图像,如图 3(b)所示。

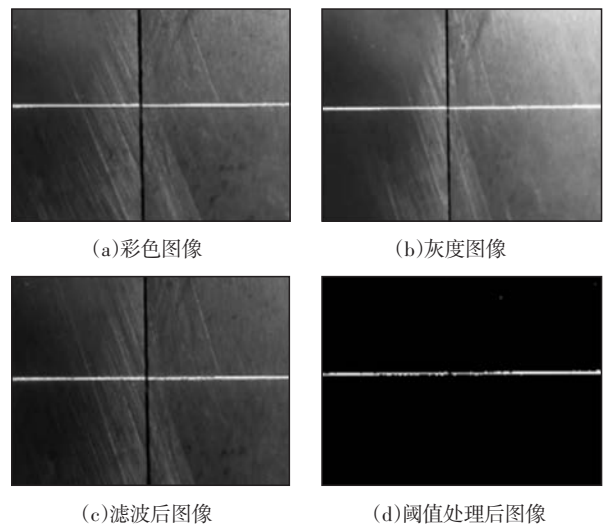


图 3 图像预处理过程

Fig.3 Image Preprocessing Process

焊接过程未开始时,不受弧光、烟尘、飞溅的干扰,但图像在采集或传递过程中通常会受到各种噪声的影响,比如焊接材料表面不平整以及反光影响,这些因素都会导致图像的重要信息丢失,从而给特征点的识别增加一定的难度,所以需要采用滤波的方法来滤除噪声的干扰,同时,突出图像中有用的信息。图像滤波处理可以分为线性滤波和非线性滤波,当信号与噪声的频谱混杂在一起时线性滤波通常会使得图像边缘和细节变得模糊,降低边缘提取的可识别性^[7]。中值滤波作为非线性滤波中最常用的方法,被广泛用于消除图像噪声,通过对比,最终选择中值滤波来消除图像噪声的影响,标准的一维中值滤波器定义为^[8]:

$$Y_k = med \{ x_{k-N}, x_{k-N+1}, \dots, x_k, \dots, x_{k+N-1}, x_{k+N} \},$$

$$(K, N) \in A \tag{1}$$

式中:med—中值滤波算子,取中值二维图像的中值滤波为:

$$Y_{ij} = med \{ x_{ij} \} \tag{2}$$

式中:A—滤波窗口;{x_{ij}}—二维序列。

滤波处理后的图像,如图 3(c)所示。可以看到一些较亮的孤立亮点已被滤除。

此时,可以从图像中看到焊接板材和激光条纹处于同一个视野中,不利于特征点的识别,因此需将焊接板材与激光条纹的图像进行分离,灰度处理之后图像的直方图统计,如图 4 所示。可以从图中发现,经灰度处理之后激光条纹的灰度值在(225~250)

之间,采用直方图对图像灰度值进行统计可以为阈值处理确定一个初始阈值范围。

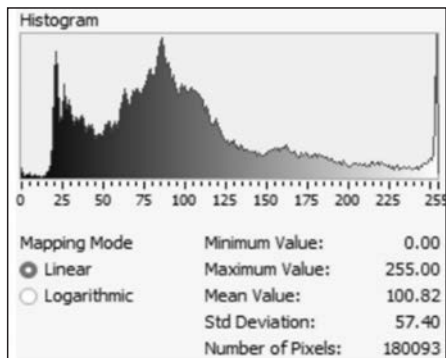


图4 灰度图像直方图
Fig.4 Histogram of Gray Image

阈值处理后的激光条纹图像,如图3(d)所示。可以看到此时图像中前景与背景已经分离,基于灰度阈值的分割可以将图像的前景与背景分割,从而只保留有用的前景图像^[9]。图像阈值分割公式可表示为:

$$A(x, y) = \begin{cases} 1, & f(x, y) \geq T \\ 0, & f(x, y) < T \end{cases} \quad (3)$$

式中: $f(x, y)$ —原始图像;

T —设定的图像阈值;

$A(x, y)$ —阈值分割后的图像。

当原始图像的阈值大于或等于所设定的阈值时, $A(x, y) = 1$,也就是图像变为白色;当原始图像阈值小于所设定的阈值时, $A(x, y) = 0$,图像变为黑色,通过阈值分割可以有效去除背景图像带来的干扰,实现前景与背景分离。

3.2 焊缝图像后处理

焊缝图像经预处理后还存在一些空洞不连续的现象,如图3(d)所示。不能用于焊缝特征点的识别,因此需要采用图像形态学(Morphology)处理方法消除图像中空洞不连续现象,以确保激光条纹不断裂。这里对阈值处理后的图像首先采用膨胀运算,然后采用腐蚀运算处理激光条纹与焊缝边缘图像,经实验对比发现,在室内普通光照明情况下,连续进行四次膨胀运算和四次腐蚀运算时得到的焊缝图像效果最好,膨胀处理和腐蚀处理后的图像,如图5(a)、图5(b)所示。可以从图像中看到,激光条纹中的空洞现象相较于阈值处理后的图像已经消失,激光条纹更加明亮,焊缝的特征位置更加突出。焊缝特征位置只包含在整个图像中的一小部分,为了屏蔽焊缝图像中的无用信息,提高程序处理图像的速度,采用开小窗(ROI感兴趣区域提取)的方式来提取整个图像中的一小部分来进行图像处理。



(a)膨胀处理

(b)腐蚀处理



(c)canny边缘检测处理

图5 焊缝图像形态学处理

Fig.5 Morphological Processing of Weld Image

经形态学处理后的焊缝图片,可以看到激光条纹显著增强,但图像中的毛刺也相对增强,不利于后期的检测,想要进一步得到焊缝位置的关键信息,必须检测到激光条纹的边缘,因为边缘包含了图像中有用的信息,因此考虑提取激光条纹和焊缝边缘来提取焊缝中心,通常,我们把图像中灰度值变化剧烈的区域边界称为边缘^[10],边缘检测的目的是提取出激光条纹与焊缝的边界区域。Labview中常用的非线性边缘检测算法有非线性梯度(Non-linear Gradient)算法、Roberts算法、差值(Differentiation)算法、Sobel算法、Canny算法、Prewitt算法、Sigma算法,通过对比发现,Canny边缘检测算法相较于其他几种算法效果更好。Canny边缘检测算法来源于1986年John Canny发表的一篇关于图像检测的论文^[11]。Canny边缘检测属于非线性高通滤波,可以对虚假边缘的响应得到最大的抑制,使用Canny算法进行非极大值抑制的过程,如图6所示。假设中心点 C 的梯度方向为图中虚线,那么准确的边缘点应位于这条虚线上,因为Canny算法图像处理过程是基于 c 点邻域内的8个点,可以通过 a_1 、 a_2 点用线性插值的方法计算出 b_1 的梯度,同理可以通过 a_3 、 a_4 计算出 b_2 的梯度,若 c 点梯度是这两个点中梯度最大的点,则说明 c 点即为精确的边缘点^[12]。当图像中出现干扰噪声,信噪比较差的情况下也能快速准确的检测到图像边缘,采用Canny边缘检测算法处理后的激光条纹图像,如图5(c)所示。

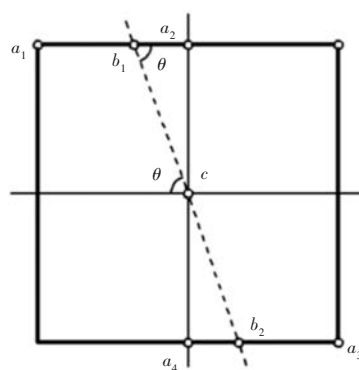


图6 Canny非极大值抑制

Fig.6 Canny Non-Maximum Inhibition

在对激光条纹进行边缘提取后,可以看到,图像中仅剩激光条纹的边界区域,但边界区域具有一定的宽度,为了准确确定焊缝特征点的最终位置,需要采用图像细化的方法来对激光条纹进行细化处理,本研究采用Labview自带的IMAQ Skeleton控件对焊缝图形进行骨架提取,骨架提取的过程也就是对图像进行细化处理的过程,图像的原始形状和方向信息经骨架提取后仍能保持不变,IMAQ Skeleton控件具有三种操作模式,分别为L型骨架提取、

M型骨架提取和Skiz骨架提取,L型适合于提取L形状的目标骨架,通过对比3种操作模式,最终选择L型骨架提取操作对焊缝激光条纹进行细化处理。图像骨架提取的原理为:将整个图像从外向内进行边缘的扫描,当扫描到激光条纹上边缘时,将扫描到的边缘点坐标记为 x_1 ,当扫描到激光条纹下边缘时,将扫描到的边缘点坐标记为 x_2 ,然后对上下两边缘点进行求和取平均值,即可得到图像的中心位置 Y ,将得到的各中心位置坐标点相连,便得到完整的细化图像。

$$Y = (x_1 + x_2) / 2 \quad (4)$$

骨架提取后的激光条纹,如图7所示。可以从图像中看到经骨架提取后的激光条纹较光滑且条纹粗细具有较好一致性。

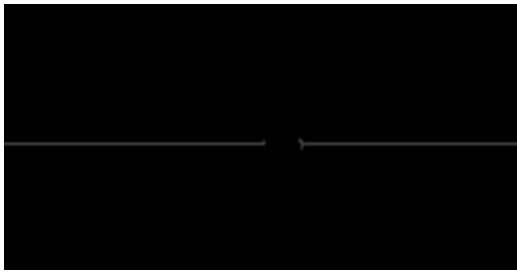


图7 Skeleton骨架提取处理放大图
Fig.7 Enlargement of Skeleton Extraction and Processing

4 焊缝特征点的提取

焊缝特征点的提取是整个图像处理中最关键的一步,直接影响到焊缝跟踪的精度^[13]。对于薄板小间隙对接型焊缝,这里采用Shi-Tomasi角点检测的方法来实现焊缝特征点的检测。Shi-Tomasi角点检测算法是对Harris检测算法的优化,其原理是基于一个小窗口在整幅图像的各个方向进行移动,根据所覆盖图像的相似度进行判断,在小窗口移动过程中,若窗口内灰度值发生了较大的变化则判断为找到角点。两个窗口内图像的相似度,如式(5)所示。

$$E(u, v) = \sum_{(x, y) \in \omega} \omega(x, y) [I(x + u, y + v) - I(x, y)]^2 \quad (5)$$

式中: $\omega(x, y)$ —矩形窗函数;

$I(x + u, y + v)$ —移动的窗口图像;

$I(x, y)$ —原图像,对 $I(x + u, y + v)$ 进行Taylor展开得:

$$I(x + u, y + v) = I(x, y) + \frac{\partial I}{\partial x} u + \frac{\partial I}{\partial y} v + o(u^2, v^2) \quad (6)$$

将式(6)代入式(5)得式(7):

$$E(u, v) \approx [u, v] M [u, v] \quad (7)$$

式中: M —自相关矩阵,可表示为:

$$M = \sum_{(x, y) \in \omega} \omega(x, y) \begin{bmatrix} I_x^2 & I_x I_y \\ I_x I_y & I_y^2 \end{bmatrix} \quad (8)$$

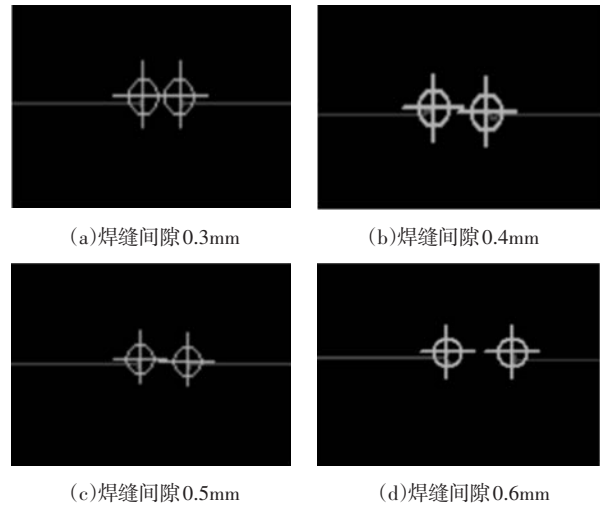
因此可将两个窗口的近似度表示为:

$$E(u, v) \approx Au^2 - 2Cuv + Bv^2 \quad (9)$$

Shi-Tomasi角点检测算法与Harris角点检测算法的区别是响应值不同,使用Shi-Tomasi角点检测算法所得到的角点检测结果比Harris检测算法得到的结果更好,检测速度也优于Harris检测算法。

5 实验验证

为了验证Shi-Tomasi角点检测算法对于薄板小间隙焊缝特征点识别的有效性,进行了焊缝特征点识别检测,采用厚度为2mm,焊缝间隙分别为0.3mm、0.4mm、0.5mm、0.6mm的铝合金薄板采用Shi-Tomasi角点检测算法得到的焊缝特征点位置图像,如图8所示。



(a)焊缝间隙0.3mm (b)焊缝间隙0.4mm
(c)焊缝间隙0.5mm (d)焊缝间隙0.6mm

图8 不同焊缝间隙特征点识别图像(放大图)

Fig.8 Recognition Image of Feature Points of Different Weld Gaps (Enlarged View)

相应的焊缝左边缘与右边缘位置信息,如表1所示。由表1可以看出,特征点位置的识别具有一定的误差,误差范围不超过0.15mm,这个误差范围是可以接受的,证明本研究提出的Shi-Tomasi角点检测算法对于薄板小间隙对接焊焊缝特征点识别具有一定的可行性。实现Shi-Tomasi角点检测编写的部分程序代码,如图9所示。

表1 焊缝特征点位置信息(标定后结果)
Tab.1 Position Information of Characteristic Points of Weld(Result After Calibration)

序号	左边缘/mm	右边缘/mm	宽度/mm
(a)	(30.65, 24.52)	(31.07, 24.52)	0.42
(b)	(30.23, 25.52)	(30.77, 24.56)	0.54
(c)	(32.73, 26.31)	(33.37, 26.33)	0.64
(d)	(34.70, 22.16)	(35.43, 22.16)	0.73

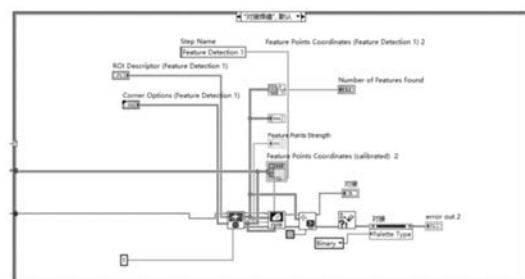


图9 Shi-Tomasi角点检测部分程序代码图

Fig.9 Shi-Tomasi Corner Detection Part of the Program Code Diagram

6 总结

(1)通过 Labview 实现了薄板小间隙对接焊缝的图像预处理,采用图像灰度处理、中值滤波算法和阈值分割算法,有效去除了图像中的噪声点,实现了图像前景与背景的分离,从而避免了图像中噪声对焊缝特征位置提取的干扰。

(2)采用图像形态学处理算法对激光条纹进行增强处理,消除了图像中激光条纹的空洞不连续现象,并获得了细化后的激光条纹。

(3)针对薄板小间隙对接焊缝特征点的检测应用了一种基于 Labview 的 Shi-Tomasi 角点检测算法,并编写了焊缝特征点检测算法,采用 Shi-Tomasi 角点检测算法可以快速准确的提取到薄板小间隙对接焊缝特征点的位置,对于薄板小间隙对接焊缝特征点的识别与检测具有一定的借鉴意义。

参考文献

- [1] 盛仲曦,马宏波,卫善春,等.基于视觉传感的焊缝跟踪技术[J].上海交通大学学报,2010,44(S1):130-133.
(Sheng Zhong-xi, Ma Hong-bo, Wei Shan-chun, et al. Weld tracking technology based on visual sensing[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2010, 44(S1): 130-133.)
- [2] Zhang Gong, Zhang Yu-hang, Tuo Shuai-hua, et al. A novel seam tracking technique with a four-step method and experimental investigation of robotic welding oriented to complex welding seam[J]. Sensors, 2021, 21(9).
- [3] 顾网平,李心洁,彭思平,等.基于视觉传感的薄板焊缝特征亚像素提取方法[J].焊接技术,2015,44(4):16-19+28.
(Gu Wang-ping, Li Xin-jie, Peng Si-ping, et al. Subpixel extraction method of thin plate weld feature based on visual sensing[J]. Welding Technology, 2015, 44(4): 16-19+28.)
- [4] 何焯,李冰,翟永杰.基于视觉传感的薄板对接焊缝特征提取方法的研究[J].热加工工艺,2021(19):114-118+123.
(He Xuan, Li Bing, Zhai Yong-jie. Research on feature extraction method of thin plate butt weld based on visual sensing [J]. Hot Working Technology, 2021(19): 114-118+123.)
- [5] 陈海永,杜晓琳,董砚.薄钢板搭接焊缝的微小特征实时识别[J].焊接技术,2014,43(10):15-19+27.
(Chen Hai-yong, Du Xiao-lin, Dong Yan. Real-time identification of micro features of lap weld of thin steel plate [J]. Welding Technology, 2014, 43(10): 15-19+27.)
- [6] 朱永超.焊接机器人焊缝跟踪与自动纠偏系统的研究[D].杭州:浙江工业大学,2018:15-18.
(Zhu Yong-chao. Research on welding robot weld tracking and automatic correction system [D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2018: 15-18.)
- [7] Fan Jun-feng, Jing Feng-shui, Yang Lei, et al. A precise initial weld point guiding method of micro-gap weld based on structured light vision sensor[J]. IEEE Sensors Journal, 2019, 19(1): 322-331.
- [8] 杨小静.基于 LabVIEW 和 Matlab 的图像去噪研究[D].长沙:湖南师范大学,2014:18-23.
(Yang Xiao-jing. Research on image denoising based on LabVIEW and MATLAB [D]. Changsha: Hu'nan Normal University, 2014: 18-23.)
- [9] 袁攀,孔建益,仄士春,等.V型焊接坡口图像处理方法的研究[J].机械设计与制造,2017(6):64-66.
(Yuan Pan, Kong Jian-yi, Ze Shi-chun, et al. Research on V-shaped welding groove image processing method [J]. Machinery Design & Manufacture, 2017(6): 64-66.)
- [10] 王浩.基于机器视觉的焊缝自动跟踪系统研究[D].徐州:中国矿业大学,2017:29-33.
(Wang Hao. Research on automatic weld tracking system based on machine vision [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2017: 29-33.)
- [11] Hu Teng-yan, Qi Zhan-feng, Qin Yu-feng, et al. Detecting technology of current generator blade shape based on improved canny algorithm [J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2018, 452(3).
- [12] 杨高科.图像处理、分析与机器视觉[M].北京:清华大学出版社,2018:278-287.
(Yang Gao-ke. Image Processing, Analysis and Machine Vision [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2018: 278-287.)
- [13] 张万江,许敏.基于结构光视觉的激光拼焊焊缝质量检测方法研究[J].机械设计与制造,2011(3):156-158.
(Zhang Wan-jiang, Xu Min. research on quality inspection method of laser tailor welded joint based on structured light vision [J]. Mechanical Design and Manufacturing, 2011(3): 156-158.)
- [6] 李小强,孟庆阔,杜一凡,等.拧紧策略对航空发动机单螺栓连接预紧力的影响[J].机械工程学报,2020,56(13):231-241.
(Li Xiao-qiang, Meng Qing-kuo, Du Yi-fan, et al. The influence of tightening strategy on the preload of aeroengine single bolt connection [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56(13): 231-241.)
- [7] Roloff, Arne, Persson, et al. Ultrasonic tightening control of a screw joint: a comparison of the clamp force accuracy from different tightening methods [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C. Journal of Mechanical Engineering Science, 2016, 230(15): 2595-2602.
- [8] Nassar S A, Sun T S. Surface roughness effect on the torque-tension relationship in threaded fasteners [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers-Part J, 2007, 221(2): 95-103.

(上接第 47 页)