DOI: 10.3901/JME.2013.20.042

焊缝磨抛机器人视觉算法实现及其试验研究*

赵继 赵军 张雷 韩飞飞 樊成
(吉林大学机械科学与工程学院 长春 130025)

摘要: 为实现大型结构件焊后焊缝自动磨抛, 磨抛机器人除了具备移动能力和磨抛能力外, 更需要在复杂和不规则的工业环境中对焊缝进行准确的跟踪和测量, 进而为焊缝磨抛提供有效的加工参数。将两个电荷耦合器件(Charge-coupled device, CCD)相机和激光器搭载在吸附移动机器人本体上, 构成焊缝磨抛机器人视觉系统。根据结构光的亮度分布特征, 提出定位图像感兴趣区域(Region of interest, ROI)的算法, 减小了计算量, 提高了计算效率; 提出在噪声干扰条件下快速检测结构光特征线的列高斯差分算法, 成功提取结构光特征线; 提出差分最值粗定位-距离阈值精定位的焊缝边缘点检测算法, 快速、精确提取焊后焊缝的边缘点, 计算出焊后焊缝的几何信息。图像处理试验及相应的焊缝磨抛试验结果表明: 该视觉系统稳定、可靠, 视觉算法快速、精确并且具有很好的鲁棒性, 为复杂工业环境下大型结构件焊缝磨抛自动化奠定了基础。

关键词: 磨抛 视觉算法 焊后焊缝 结构光

中图分类号: TP242

Vision Algorithm and Experimental Study on the Robotic Weld-bead Grinding and Polishing System

ZHAO Ji ZHAO Jun ZHANG Lei HAN Feifei FAN Cheng

(College of Mechanical Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130025)

Abstract: To automatically grind and polish weld bead on large-scale structure parts, grinding/ polishing robot should not only be capable of moving and polishing, but also accurately tracking and measuring the weld bead in complex industrial environment. The collected data is useful for weld-bead grinding and polishing. The vision system for the grinding and polishing robot in this paper consists of a double charge-coupled device(CCD) camera and a laser, both fixing on the robot. According to the brightness distribution of structured light, a region of interest(ROI) positioning algorithm for image pair is proposed. By using the new algorithm, the calculating efficiency is largely improved. Gaussian differential method related to the image columns is proposed, and the typical lines of structured light can be extracted from noise-polluted images. Rough location of the weld bead edge is realized by finding maximum and minimum difference values, while the exact bead edge is accurately and rapidly extracted based on definition of distance threshold. Thus, the geometric information of the weld bead can be obtained. The results of image processing experiments and grinding/ polishing experiments show that the visual system is reliable and stable, and vision algorithm is rapid and accurate. The system would lay foundation for automatically grinding and polishing large-scale structure parts in a complex industrial environment.

Key words: Grinding/polishing Vision algorithm Weld bead Structured light

0 前言

对于焊接后的大型结构件, 多余的焊缝材料必须去除, 使去除后的焊缝表面和被连接表面相协调, 这样在喷漆后不仅焊缝不可见, 能得到光滑美观的结构件表面, 而且在一定程度上可以消除焊接的残余应力。目前, 大型结构件焊缝还要依靠工人

手工磨抛, 不仅效率低、精度差、劳动强度大, 而且经常需要在高空和狭小的空间进行危险作业, 还要面对着磨抛过程中产生的粉尘, 所以迫切需要大型结构件焊缝磨抛自动化。然而, 轮船船体、列车车身等大型结构件尺寸都在几十 m 以上, 有的还是曲面, 机床磨抛此类焊缝柔性不足, 自主移动磨抛机器人是很好的选择。机器人自动磨抛焊缝, 除了需要具备移动能力和磨抛能力外, 更关键的问题是需要准确识别和测量焊后的焊缝, 以控制机器人位姿和加工参数, 达到良好的磨抛效果。机器视觉已

* 国家自然科学基金资助项目(50975123)。20130423 收到初稿, 20130802 收到修改稿

经广泛应用于焊前焊缝的识别、跟踪和测量中^[1-3], 形式上主要有被动视觉和主动视觉两种, 结构上主要有单目和双目两种, 焊缝图像处理方法主要有时域法和空域法, 然而无论哪种方法, 其核心问题都是能否在不同光照条件下、不同噪声信号干扰下、不同种类的焊缝图像中准确、快速地提取真实、有效的焊缝信息。传统的焊前焊缝特征提取方法主要包括: 基于梯度算子的焊缝边缘检测方法^[4]、基于卡尔曼滤波的检测方法^[5]、基于图像匹配的焊缝检测方法^[6-7]、基于霍夫变换的直焊缝检测方法^[8]、基于数学形态学的焊缝边缘检测方法^[9]、基于小波变换的焊缝检测法^[10]以及利用激光结构光的灰度图像搜索法^[11]等。在前人的研究基础上, CHEN 等^[12]利用基于泽尔尼克矩阵的方法, 提取了焊缝的亚像素边缘; 屈稳太等^[13]改进了霍夫变换方法, 高效地提取了焊缝位置; 周律等^[14]提出了打断直线算法, 提取细化后的焊缝边缘; 周富强等^[15-16]利用改进的 STEGER 算法快速、精确地提取了结构光中心线并应用到了实际测量中。

比较焊前和焊后的焊缝, 焊后焊缝形状极其不规则, 母材区和焊接金属材料连接处分界不明显, 加之磨抛过程中产生的粉尘、飞溅以及工业环境中的光线变化, 使得焊前和焊后焊缝的识别、测量差异较大, 目前, 国内外对焊后焊缝的识别、跟踪和三维测量的研究很少。

针对上述问题, 本文在小型自主移动磨抛机器人上搭建基于双目视觉和激光结构光的视觉系统。对于采集的焊后焊缝结构光图像, 提出感兴趣区域 (Region of interest, ROI) 定位算法, 在定位的 ROI 内利用结构光光条截面亮度近似高斯分布的特点, 构造列高斯差分滤波器, 提取结构光光条的中心点, 对中心点的位置数据使用差分最值粗定位, 距离阈值精定位的算法对焊后焊缝的边缘点和最高点进行检测。对于边缘点和最高点的像素坐标, 利用双目视差原理经坐标变换可以计算得到焊缝边缘点和最高点在机器人坐标系内的坐标, 进而得到焊缝的几何信息和最高点的空间位置信息, 依据这些数据信息就可以控制机器人的位姿和磨抛参数, 为焊缝磨抛自动化奠定了基础。

1 磨抛机器人视觉系统

焊缝磨抛机器人结构如图 1 所示, 其中视觉子系统由两个电荷耦合器件 (Charge-coupled device, CCD) 相机、激光器、图像采集卡以及主控计算机组成, 两个 CCD 相机对称布置, 激光投射线平行两

相机基线。视觉系统的工作原理如下: 在机器人前进一个行程的过程中, 采集若干帧图像, 对两个相机采集到的同一组图像对进行图像处理, 在每组图像中采用图像处理算法检测到结构光平面内焊缝最高点以及焊缝两个边缘点, 对一组图像对内对应的最高点和边缘点利用视差原理进行计算, 计算焊后焊缝的三维信息和焊缝特征点在机器人坐标系下的坐标, 进而控制机器人和磨抛工具的位姿以及磨抛参数。视觉系统采集的图像是 $1\,628\text{ 像素} \times 1\,236\text{ 像素}$ 的 8 位灰度图像, 沿着焊缝方向每隔 2.5 mm 采集一帧图像。

图 1 焊缝磨抛机器人照片

1. CCD 相机(左) 2. 激光器 3. 气动马达 4. 磨抛工具头
5. 焊缝 6. CCD 相机(右)

2 结构光光心检测

结构光光心提取是焊缝磨抛机器人视觉系统功能实现的关键问题, 本文提出的结构光光心提取算法, 无需图像前处理, 可直接应用于存在噪声信号的焊缝结构光图像, 提取图像内结构光光心的准确位置, 算法分为以下两步: ① 定位包含焊后焊缝及其边界的 ROI; ② 在 ROI 内采用“列高斯差分算法”检测结构光光条中心点, 具体的提取过程如下文所述。

2.1 定位 ROI

ROI 通常是包含图像特殊信息的区域, 本算法所指的 ROI 是结构光光条投影在焊缝及其边界的区域, 在 ROI 内处理图像, 无须对整幅图像进行处理, 不仅极大地减小计算量, 而且避免了 ROI 外图像噪声信号的影响。CCD 现场采集的结构光图像, 结构光光条由两条直线段和一条曲线段构成, 光条和图

像的行列坐标轴成一定角度。本研究中,相机和激光器的空间布置使得激光投射线和两个 CCD 相机基线平行,同一图像对经过共极线校正后,图像上的激光投射线平行于图像的列坐标轴。根据现场试验情况,在校正后的图像内选择 800 像素×600 像素大小的区域作为初选的 ROI,该区域包含焊缝所有关键信息。由于光条沿着截面方向的亮度分布近似高斯分布,光条截面中心处的亮度最大,因而可以在初选的 ROI 内,投影各像素点的灰度值到图像行坐标轴,将投影灰度值累加,图像的像素灰度累加值分布如图 2 所示,图像峰值点是 ROI 内光条的大部分的中心像素点灰度值的累加结果,所以累加和最大位置点的行坐标即可作为 ROI 中心点的行坐标,为了提高计算效率采取隔列扫描灰度值进行累加计算的方式,ROI 行坐标取值范围可以根据式(1)和式(2)得到

$$S(j) = \sum_{j=1}^{0.5w} f(i, 2j-1) \quad j=1, 2, \dots, 0.5w \quad i=1, 2, \dots, h \quad (1)$$

$$[R_{\min}, R_{\max}] = [i_{\max}^{s(j)} - \Delta h, i_{\max}^{s(j)} + \Delta h] \quad (2)$$

式中, $S(j)$ 为第 i 行奇数列的所有像素点灰度值累加和, w 为图像宽度, h 为图像高度; $f(i, 2j-1)$ 为第 i 行, $2j-1$ 列像素点的灰度值; $[R_{\min}, R_{\max}]$ 为 ROI 的行坐标取值范围; $i_{\max}^{s(j)}$ 为灰度累加值最大位置点的行坐标; Δh 为 ROI 高度的预留值,一般取激光条宽度的 6~10 倍。

图 2 灰度累加值分布图

为确定校正后图像 ROI 的宽度范围,构造如图 3 所示大小为 5 像素×5 像素的滤波模板 $W(x, y)$,模板元素值为 1,记 $i_{\max}^{s(j)}$ 行及其以下 4 行图像在点 (x, y) 处的灰度值为 $g(x, y)$,对 $g(x, y)$ ($y=0, 1, 2, 3, 4, 5$) 进行式(3)的卷积运算

$$g^*(x, y) = W(x, y) * g(x, y) = \sum_{s=-2}^2 \sum_{t=-2}^2 W(s, t) f(x+s, y+t) \quad (3)$$

由于在焊缝处结构光条呈曲线形状,ROI 中心行附近的曲线光条下方的像素点卷积响应值较小,因而可以根据卷积响应值粗略定位曲线光条下方像

素的位置。设 T_g 为灰度阈值, l_g 为试验获得的长度阈值,储存满足 $g^*(2, y) < T_g$ 的(3)式结果的 y 值,记为 y_k ,判断储存的所有 y_k 是否满足 $y_{k\max} - y_{k\min} < l_g$,不满足则剔除 $y_{k\max}$ 和 $y_{k\min}$ 再次判断,直至满足长度阈值条件,计算满足长度阈值条件的 y_k 的平均值 y_{ave} ,则 y_{ave} 即为 ROI 中心的列坐标。将上述得到的 ROI 中心列坐标 y_{ave} 代入式(4)就可以得到 ROI 列坐标的范围

$$[C_{\min}, C_{\max}] = [y_{ave} - l_l, y_{ave} + l_l] \quad (4)$$

式中, $[C_{\min}, C_{\max}]$ 为 ROI 列坐标取值范围; l_l 为列方向预留长度,一般取图像上焊缝宽度的 3~5 倍。依据式(2)和式(4)的结果,就可以得到完整的 ROI 范围,本文设置的 Δh 为 75 像素, l_l 为 150 像素,故 ROI 大小为 301 像素×151 像素,得到的 ROI 区域如图 4 所示(为清晰显示,图片长宽均扩大 1.5 倍)。

$W(-2, -2)$	$W(-2, -1)$	$W(-2, 0)$	$W(-2, 1)$	$W(-2, 2)$
$W(-1, -2)$	$W(-1, -1)$	$W(-1, 0)$	$W(-1, 1)$	$W(-1, 2)$
$W(0, -2)$	$W(0, -1)$	$W(0, 0)$	$W(0, 1)$	$W(0, 2)$
$W(1, -2)$	$W(1, -1)$	$W(1, 0)$	$W(1, 1)$	$W(1, 2)$
$W(2, -2)$	$W(2, -1)$	$W(2, 0)$	$W(2, 1)$	$W(2, 2)$

图 3 滤波模板

(a) 左 CCD 相机采集图像 ROI (b) 右 CCD 相机采集图像 ROI

图 4 结构光图像 ROI

2.2 结构光中心点检测

线结构光光条沿着截面方向的亮度在理想状态下呈高斯分布,由于反光、表面凸凹变化等噪声信号影响,实际光条沿其截面的亮度分布只近似高斯分布,本研究的光条沿列方向(光条法线方向)的亮度分布情况如图 5 所示。焊缝高度和位置检测的首要问题是定位结构光中心线,但对于工业环境中的焊缝结构光图像,实际上由于严重的噪声信号污染,沿某列最亮的点不一定是结构光光条截面中心,有时某列还会出现几个亮度最大的峰值点。为了解决上述问题,本研究采用“列高斯差分算法”,检测光条上下边缘,取上下边缘的中点作为中心点。

根据光条截面亮度分布的特点,采用一维差分滤波器,以光条图像的列为信号处理对象,进行差分运算,对差分运算后的数据进行一维高斯滤波去噪以减弱噪声信号的影响,当采用较大的 σ 时,能够较好地抑制噪声信号,但原始数据被严重平滑,

图5 某列像素点灰度值分布图

特征损失严重, 使用较小的 σ 时, 情况则相反, 所以要根据实际试验情况选择合适的 σ 和合适的滤波器模板长度。由于差分滤波器和一维高斯滤波器均是线性滤波器, 为提高运算效率, 根据线性系统的性质, 可以把二者合二为一, 本文称其为“列高斯差分滤波器”, 简记为 R_k , 则

$$R_k = \frac{k}{\sqrt{2\pi}\sigma^3} \exp\left(-\frac{k^2}{2\sigma^2}\right) \quad (5)$$

式中, σ 为高斯函数的标准差, k 为构造的滤波模板元素索引。

将图像 ROI 内像素点的灰度值按列和 R_k 构造的模板卷积, 记 (x,y) 处像素的灰度值为 $f(x,y)$, 则卷积后的灰度值记为 $f^*(x,y)$, 计算过程如式(6)所示

$$f_k^*(x,y) = \sum_{k=-m}^m f(x+k,y) \cdot R_k \quad (6)$$

式中, m 为构造的卷积模板长度加上 1 后取半。

将 R_k 构造的模板旋转 180° , 和 $f(x,y)$ 卷积, 如式(7)所示, 比较式(6)和式(7)的结果, 可得式(8)

$$f_{-k}^*(x,y) = \sum_{k=-m}^m f(x+k,y) \cdot R_{-k} \quad (7)$$

$$f_k^*(x,y) = -f_{-k}^*(x,y) \quad (8)$$

可见, 虽然高斯滤波器是对称结构, 差分滤波器是非对称结构, 但构造的列高斯差分滤波器不影响边缘检测的结果, 只是检测到的两个边缘一个是由暗到亮, 另一个是由亮到暗, 取两个边缘的行坐标中点作为该列结构光亮度中心的行坐标, 可以得到结构光单像素中心线。

3 焊缝测量

高出母材板部分的焊后焊缝的三维几何信息对焊缝磨抛参数的规划有极大的意义, 第 2 节得到的结构光中心点位置数据必须经过处理才能快速准确地得到焊缝的三维几何信息。处理这些数据的核心问题是找到焊接材料和母材板的连接区域, 即焊后焊缝的边缘, 只有准确找到沿焊缝长度方向的边缘才能计算出焊缝的高度、宽度以及母材板上方的

焊接材料的体积。焊后焊缝的边缘和被焊接工件之间的夹角以及工件表面形状有关, 因此本文定义焊后焊缝边缘为: 在焊接区域内, 明显偏离母材板表面的焊接材料的边缘。确定了边缘点(记为点 P_1 和点 P_2)以后, 把两个边缘点拟合为直线 P_1P_2 , 这条直线上两个边缘点之间的线段长定义为图像坐标系内焊缝宽度, 最高点在这条直线的距离定义为图像坐标系内焊缝高度, P_1P_2 和 P_1P_2 上方的结构光中心线围成的面积就是该处图像坐标系内焊缝截面的面积。将焊缝最高点以及焊缝边缘点的图像坐标, 转换成世界坐标, 世界坐标下两对应边缘点的距离即为焊缝宽度, 最高点到两边缘点连线的空间距离即为焊缝的高度。根据图像坐标系内的多个截面面积经坐标变换就可以计算焊缝沿着长度方向的体积以及每次磨抛的去除量。针对焊后焊缝形状极其不规则、形状高度依赖母材板的特点, 本文采用差分最大值粗定位, 距离阈值精定位的方法计算焊缝的边缘位置, 依据双目视觉测量原理, 精确求出了焊缝的宽度和高度。

如图 6 所示为结构光中心点位置数据经低通滤波处理后的图像。

图6 低通滤波后的光心位置

设其横坐标为 x , 相应的位置纵坐标为 $f(x)$, 进行式(9)的差分运算

$$\frac{\partial f}{\partial x} = f(x+1) - f(x) \quad (9)$$

差分后的图像由于噪声信号影响, 差分值会产生大的波动, 所以要经过低通滤波处理, 处理后的图像如图 7 所示。

图7 低通滤波后的光心纵坐标差分值

利用图 6、7 的数据和中心点位置原始数据，焊后焊缝边缘位置提取算法如下所述。

(1) 搜索低通滤波后图像差分值的最大、最小值位置，粗略定位焊缝边缘区域。

(2) 设长度阈值为 l_w ，左右峰值点的横坐标分别为 X_{peak1} 、 X_{peak2} ，则拟合 $[X_{peak1}-l_w, X_{peak2}+l_w]$ 范围以外的结构光中心点成直线 l_{base} ，则 l_{base} 可以表示母材板表面基线。

(3) 从 X_{peak1} 位置开始向右搜索未经低通滤波处理的结构光中心位置的原始数据，刚刚偏离基线 l_{base} 的点 P_{edge1} 为右边缘点。

(4) 从 X_{peak2} 位置向左搜索结构光位置的原始数据，刚刚偏离基线的点 P_{edge2} 为左边缘点。

(5) 设连接点 P_{edge1} 、 P_{edge2} 的直线 l_{edge} ， P_{edge1} 与 P_{edge2} 之间的线段长为焊缝宽度，距离直线 l_{edge} 距离最大的点便为焊缝的顶点，顶点到直线的距离为焊缝高度， l_{edge} 与其上方的结构光中心线围成的截面面积即可作为求取焊缝长度方向体积和每次去除量的基础。

4 视觉系统试验研究

4.1 试验装置

为分析该视觉系统的精度，验证视觉算法的有效性，检验视觉系统的反馈参数对焊缝磨抛的指导效果，进行了精度测量试验、图像处理试验和焊缝磨抛试验。在视觉系统中，两个分辨率为 1 628 像素×1 236 像素的 CCD 相机对称布置，高功率线激光器投影方向和焊缝垂直，视觉系统标定采用 halcon10.0 软件标定。根据视觉系统的测量参数，实时控制磨抛片的进给量和进给速度，控制磨抛片和机器人的位姿，使磨抛片始终在焊缝的正上方磨抛，磨抛片使用 ESICUT 公司 80# 的千叶片。

4.2 焊缝测量试验

本试验的测量对象为铝合金型材板焊后连接焊缝，试验分为两个部分：焊缝三维几何尺寸测量试验和单点重复精度测量试验。

(1) 焊缝三维几何尺寸测量试验。图 8 和图 9 分别是对一段 130 mm 长的焊缝进行测量的精度试验结果，沿着焊缝方向每间隔 2.5 mm 进行一次测量，其中图 8 为焊缝宽度的测量结果，测量的平均误差为 0.082 mm，最大误差为 0.13 mm，图 9 是对焊缝高度的测量结果，测量的平均误差为 0.063 mm，最大误差为 0.09 mm，可见，该视觉系统具有良好的测量精度，能够满足焊缝磨抛的测量要求。通过增大相机分辨率、缩小相机 z 方向的高度、改

善照明条件、提高标定精度等方法可以使测量精度得到进一步提高。

图 8 焊缝宽度测量结果

图 9 焊缝高度测量结果

(2) 单点重复测量精度试验。在机器人磨抛焊缝的过程中，能够精确稳定地测量焊缝高度至关重要，图 10 为焊缝高度的单点重复精度测量试验结果，对焊缝的同一个点进行 100 次的重复测量。测量的平均值为 1.88 mm，标准差为 0.03 mm，测量结果最大值和最小值的差为 0.12 mm，从图 10 可以看出，该视觉系统具有良好的重复测量精度，动态性能稳定。

图 10 焊缝高度单点重复测量结果

4.3 图像处理效率试验

图 11 为图像处理时间试验结果，图像处理的时间除了和算法本身的计算效率相关，还和图像大小密切相关，本试验的图像大小为 1 628 像素×1 236 像素，选择的 ROI 区间大小为 301 像素×151 像素，对所采集的 100 帧焊缝结构光图像进行图像处理，图像处理的平均时间为 10.52 ms，最小时间为 9.86 ms，具有很高的计算效率，可以满足焊缝磨抛的实时检测和测量的要求。

4.4 焊缝磨抛精度试验

表 1 是机器人在视觉系统返回参数控制下的磨抛试验结果，表 2 为手工焊缝磨抛结果，磨抛工具

图 11 图像处理时间

均为同一型号千叶片，焊接材料相同。由试验结果可见：视觉系统反馈参数指导下机器人磨抛可以达到良好的表面形位精度，由磨抛对比试验可见，视觉系统可以提供给机器人正确的位姿参数和加工、进给参数。

表 1 机器人磨抛试验结果

最大高度/mm	最小高度/mm	平均高度/mm	方差/mm	极差/mm
1.53	1.30	1.41	0.09	0.27

表 2 手工磨抛试验结果

最大高度/mm	最小高度/mm	平均高度/mm	方差/mm	极差/mm
1.70	1.28	1.49	0.17	0.42

5 结论

(1) 开发了小型自主移动焊缝磨抛机器人视觉系统，对两个 CCD 相机采集的焊缝图像对，提出定位焊缝结构光图像 ROI 的算法，极大减少了计算量，提高了图像处理运算效率。

(2) 在 ROI 范围内，根据结构光光条截面亮度近高斯分布的特性，提出了检测光条中心点的“列高斯差分检测算法”，提取了结构光光条中心点位置。

(3) 在提取的结构光光条中心点位置基础上，提出差分最值粗定位-距离阈值精定位的焊缝边缘点检测算法，定义并计算了焊后焊缝的高度、宽度，给出了焊后焊缝体积计算的方法。

(4) 在视觉系统下，进行了焊缝宽度和高度的精度测量试验，测量的平均误差分别为 0.082 mm 和 0.063 mm，对于焊缝高度进行了单点测量重复精度试验，试验结果标准差为 0.03 mm。对提出的算法进行了图像处理时间试验，平均图像处理时间为 10.52 ms。

(5) 进行了磨抛对比试验，对比了机器人在视觉系统反馈参数下进行磨抛和手工磨抛的结果，磨抛的形位误差间接证明了利用视觉系统计算的磨抛参数有效。

综上，本文搭建的视觉系统稳定可靠，提出的图像处理算法能够精确、快速地提取焊缝的位置和

几何信息，为焊缝磨抛自动化奠定了坚实基础。

参 考 文 献

- [1] CHANG D J, SON D H, LEE J W, et al. A new seam-tracking algorithm through characteristic-point detection for a portable welding robot[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2012, 28: 1-13.
- [2] FANG Zaojun, XU De, TAN Min. Visual seam tracking system for butt weld of thin plate[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2010, 49: 519-526.
- [3] TUNG Picheng, WU Mingchang, HWANG Y R. An image-guided mobile robotic welding system for SMAW repair processes[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2004, 44: 1223-1233.
- [4] XU Yanling, LÜ Na, ZHONG Jiyong, et al. Research on the real-time tracking information of three-dimension welding seam in robotic GTAW process based on composite sensor technology[J]. Journal of J. Intell. Robot Syst., 2012, 19(2): 36-40.
- [5] 高向东, 罗锡柱. 基于卡尔曼滤波的焊缝检测技术研究[J]. 机械工程学报, 2004, 40(4): 172-176.
GAO Xiangdong, LUO Xizhu. Study on weld seam detection using kalman filter[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2004, 40(4): 172-176.
- [6] MARKUS H B, MATRIN L Z, MATTHIAS R, et al. Weld seam tracking and panorama image generation for on-line quality assurance[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013, 65: 1371-1382.
- [7] 程柏, 郑军, 潘际銮. 强弧光干扰下焊缝结构光图像跟踪信息获取[J]. 清华大学学报, 2008, 48(11): 1724-1727.
CHENG Bai, ZHENG Jun, PAN Jiluan. Extraction of structure light seam tracking information in the presence of strong arc light interference[J]. Journal of Tsinghua University, 2008, 48(11): 1724-1727.
- [8] 邓景煜, 张轲, 秦涛, 等. 基于动态小窗 Hough 变换的焊缝特征直线提取[J]. 焊接学报, 2011, 32(11): 37-40.
DENG Jingyu, ZHANG Ke, QIN Tao, et al. Extracting weld seam by Hough transform based on dynamic windows[J]. Transaction of the China Welding Institution, 2011, 32(11): 37-40.
- [9] 申俊琦, 胡绳荪, 冯胜强, 等. 基于数学形态学的焊缝图像边缘提取[J]. 天津大学学报, 2010, 43(4): 373-376.
SHEN Junqi, HU Shengsun, FENG Shengqiang, et al.

- Edge detection of seam image based on mathematical morphology[J]. Journal of Tianjin University, 2010, 43(4): 373-376.
- [10] 黄军芬, 蒋力培. 基于二维小波分析的焊缝坡口边缘检测[J]. 焊接学报, 2003, 24(6): 69-72.
- HUANG Junfen, JIANG Lipei. Welding seam edge detection based on 2-D wavelet analysis[J]. Transaction of the China Welding Institution 2003, 24(6): 69-72.
- [11] 李原, 徐德, 沈扬, 等. 一种焊缝结构光图像处理与特征提取方法[J]. 焊接学报, 2006, 27(9): 25-30.
- LI Yuan, XU De, SHEN Yang, et al. An image processing and features extraction method for structured light image of welding seam[J]. Transaction of the China Welding Institution, 2006, 27(9): 25-30.
- [12] CHEN Shanben, CHEN Xizhang, QIU T, et al. Acquisition of weld seam dimensional position information for arc welding robot based on vision computing[J]. Journal of Intelligent and Robotic Systems, 2005, 43: 77-97.
- [13] 屈稳太, 张瑶瑶, 颜钢锋. 基于 Hough 变换的焊缝位置检测技术[J]. 机械工程学报, 2005, 41(9): 212-216.
- QU Wentai, ZHANG Yaoyao, YAN Gangfeng. Method of detecting welding seam based on the hough transform[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2005, 41(9): 212-216.
- [14] 周律, 陈善本. 打断支线条算法及其在焊缝图像处理中的应用[J]. 机械工程学报, 2009, 45(3): 282-285.
- ZHOU Lü, CHEN Shanben. Breaking branches algorithm and its application in welding image processing[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(3): 282-285.
- [15] 周富强, 王飞, 张广军, 等. 结构光直线光条图像特征的三步法提取[J]. 机械工程学报, 2008, 44(11): 215-219.
- ZHOU Fuqiang, WANG Fei, ZHANG Guangjun, et al. Three step extraction method for line stripe in structured light vision[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2008, 44(11): 215-219.
- [16] LIU Zhen, SUN Junhua, WANG Heng, et al. Simple and fast rail wear measurement method based on structured light[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2011, 49: 1343-1351.
-
- 作者简介: 赵继(通信作者), 男, 1959 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为智能精密制造。
E-mail: jzhao@jlu.edu.cn
- 赵军, 男, 1983 年出生, 博士研究生。主要研究方向为智能精密制造。
E-mail: zhaojunhere@qq.com
- 张雷, 男, 1970 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为智能精密制造。
E-mail: profzhanglei@yahoo.com.cn
- 韩飞飞, 男, 1987 年出生。主要研究方向为智能精密制造。
E-mail: hanff87@gmail.com
- 樊成, 男, 1986 年出生, 博士研究生。主要研究方向为智能精密制造。
E-mail: fancheng2011@gmail.com