

基于结构光视觉和光照模型的焊缝表面质量检测

余佳杰, 周建平*, 薛瑞雷**, 许燕, 夏磊

新疆大学机械工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830049

摘要 为实现焊缝表面质量的自动检测, 本团队设计了一种焊缝表面质量自动检测方法。首先对焊缝图像进行处理, 提取出焊缝的中心线, 并通过最小二乘法和 K 均值聚类算法提取焊缝特征点, 进一步测量得到熔宽、余高等焊接参数; 然后根据中心线数据建立三维光照模型, 依据亮度的强弱与分布设立亮度特征, 并根据亮度特征针对无缺陷焊缝以及咬边和气孔焊缝进行了识别。结果表明, 所提焊缝表面质量检测方法对焊缝的自动识别准确率较高, 而且稳定性高, 效果好。

关键词 激光技术; 焊缝表面质量检测; 图像处理; 光照模型; 机器视觉

中图分类号 TG441.7

文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL202249.1602019

1 引言

随着自动化技术和视觉检测技术的发展, 焊缝的自动化检测成为焊接质量检测的重要目标之一, 而且对于提升焊接质量、实现焊接工业的智能化生产具有重要意义。X 射线、超声波等可用于焊后焊缝内部的无损检测, 但是检测过程复杂, 并且无法用于检测焊缝表面状况。深度视觉、双目视觉获取的焊缝信息丰富, 但是受光照和物体纹理的影响较大, 且图像处理难度大。相对而言, 线结构光传感器虽然存在容易丢失大曲率复杂表面信息的缺点, 但其具有结构简单、成本低、精度高等优势, 因此被广泛应用^[1-4]。

张万江等^[5]提出了一种可以识别光纹中心线的平均斜率法, 然后在分析激光拼焊焊缝截面轮廓特点的基础上建立了截面轮廓几何参数的计算方法。张佳^[6]设计了基于感兴趣区域划分和差异化图像增强的背景过滤算法, 并利用该算法有效滤除了图像的背景噪声。李玉^[7]使用泊松曲面重建法对点云数据进行重建, 提出了一种基于焊缝截面轮廓点的检测算法, 并采用该算法对凹坑、焊瘤进行了检测。Zhu 等^[8]提出了一种自适应光条纹亚像素中心提取算法和一种焊接光条纹特征点提取算法, 并基于这两种算法实现了焊缝宽度和高度的快速检测。Huang 等^[9]提出了一种结合正面和侧面两个方向图像的焊缝图像分析方法, 并采用该方法对凹陷缺陷进行了识别。目前, 基于结构光的焊缝质量检测的相关研究主要集中在单帧图像的检测

上, 在三维状态下实现焊缝质量检测 and 缺陷的自动化分类依旧比较困难。本文提出了一种 K 均值聚类算法和光照模型相结合的焊缝检测方法, 并采用该方法实现了焊缝缺陷的自动识别。

2 焊缝轮廓中心线及特征提取

2.1 焊缝检测系统的搭建

线结构光焊缝表面质量检测系统如图 1 所示, 该系统由三坐标运动平台、高精度滑台、轮廓测量仪、工控机、运动控制卡以及伺服驱动器等组成。轮廓测量仪的型号为 HD8-0050W, 采样精度为 90 Hz, 最大检



图 1 基于线结构光的焊缝表面质量检测实验装置图
Fig. 1 Experimental device of weld surface quality detection based on line structured light

收稿日期: 2021-11-24; **修回日期:** 2021-12-31; **录用日期:** 2022-01-17

基金项目: 自治区高校科研计划自然科学重点项目(XJEDU20181006)、2018 新疆维吾尔自治区天山雪松计划(2018xs01)、自治区自然科学基金(2017D01C038)

通信作者: *linkzhou@163.com; **1981907557@qq.com

测宽度为 50 mm,高度方向的分辨率为 0.04 mm,宽度方向的分辨率为 0.07 mm。利用激光三角法,线激光发射器将激光投射到焊缝表面形成漫反射,使反射光在图像传感器上成像,从而获得焊缝图像。轮廓测量仪采集到的焊缝图像随着高精度滑台的匀速运动被传输到工控机中,通过图像处理技术以及三维重建技术实现焊缝表面质量检测。

2.2 焊缝图像处理

焊缝表面质量检测过程中的图像处理主要分为两步:激光条纹中心线提取和特征提取。作为焊缝三维重建以及质量检测的基础,图像处理对焊缝成形尺寸的测量以及缺陷的判断都具有重要影响^[9-10]。

轮廓测量仪采集的图像如图 2(a)所示。焊缝表面本身的不规则形貌以及结构光在焊缝表面的

漫反射都会对结构光条纹的形成产生干扰,从而使图像中存在噪声干扰。本文采用高斯滤波对噪声进行处理,高斯滤波核大小为 3×3 。图 2(b)是高斯滤波处理后的图像。采用大津算法(Otsu 算法)对图像进行分割,以获得最优分割阈值,然后对图像进行二值化处理,获得焊缝的二值化图像,如图 2(c)所示。为了提高图像处理的效率和速度,对图像中的感兴趣区域(ROI)进行提取,提取结果如图 2(d)所示。

目前,常用的结构光中心线提取法有极值法、质心法和海森矩阵法等^[11-13]。其中的质心法具有精度高、速度快和鲁棒性好的特点,因此本文利用质心法提取焊缝中心线。图 2(e)所示为二值化图像下的焊缝中心线,图 2(f)为最终获得的焊缝中心线。

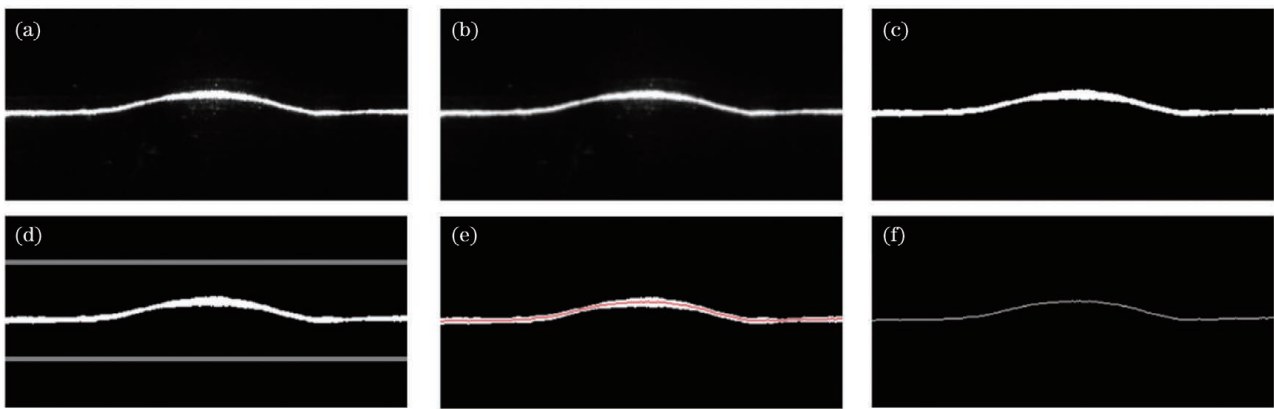


图 2 不同方法处理后的单帧焊缝图像。(a)原图;(b)高斯滤波后的图像;(c)OTSU 算法分割后的图像;(d)ROI;(e)焊缝中心线提取后的图像;(f)最终获得的焊缝中心线

Fig. 2 Single-frame weld image after different processing algorithms. (a) Original image; (b) image after Gaussian filtering; (c) image after OTSU; (d) region of interest (ROI); (e) image after weld centerline extraction; (f) finally obtained weld centerline

如图 3 所示,点 P_1 和 P_5 为焊缝中心线两侧的点, P_2 和 P_4 为焊趾点, P_3 为焊缝最高点。 $P_1 \sim P_2$ 之间以及 $P_4 \sim P_5$ 之间为焊缝的母板区域,设其拟

合直线 $l_{base}: Ax + By + C = 0$; P_2 到 P_4 的距离为焊缝的熔宽 W , P_3 到母板直线 l_{base} 的距离为焊缝余高 H 。

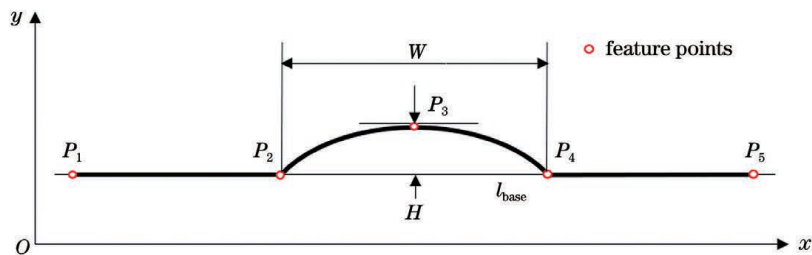


图 3 焊缝表面特征示意图

Fig. 3 Schematic of feature points of weld surface

可将焊缝截面分成两侧母板和中间焊缝两部分,故焊缝结构光中心线是两侧为直线且中间不规则的曲线。本文使用线性最小二乘法并进行迭代计算来拟合母板直线,其中各像素点到拟合直线的距离的计算公式为

$$L_i = \frac{A_i x_{l_i} + B_i y_{l_i} + C_i}{\sqrt{A_i^2 + B_i^2}}, \quad (1)$$

式中: A_i 、 B_i 、 C_i 为第 i 次拟合直线 ($l_{base,i}: A_i x + B_i y + C_i = 0$) 的参数; (x_{l_i}, y_{l_i}) ($i = 1, 2, \dots, N_i$) 为拟合的焊缝中心线上的任意点。

通过不断排除最大距离点来重新拟合母板直线,当最大距离小于设定阈值时,会在某像素点 (x_{height}, y_{height}) 处求得最大距离 L_{max} ,此即为焊缝高度 H ,该像素点位置为高度特征点,如图 4(a)所示。最后,将图

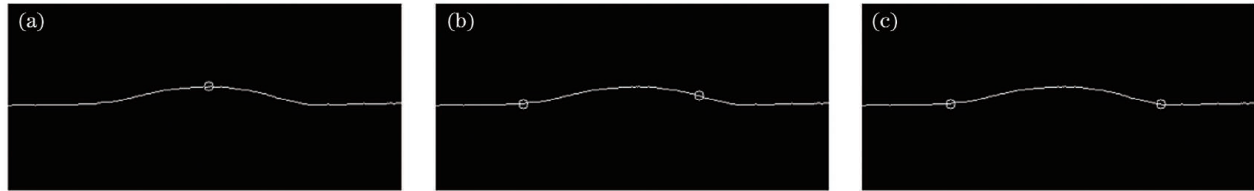


图 4 焊缝特征点提取。(a)高度特征点;(b)梯度法提取的焊趾点;(c)K 均值聚类算法提取的焊趾点

Fig. 4 Extraction of weld feature points. (a) Feature points of height; (b) welding toe points extracted by gradient method; (c) welding toe points extracted by K-means method

像以及特征点旋转一定角度(母板直线 l_{base} 与水平方向偏离的角度)来校正母板的安装误差。角度计算公式为

$$\alpha = \arctan\left(-\frac{A_{base}}{B_{base}}\right), \quad (2)$$

式中: α 为偏离角度; A_{base} 和 B_{base} 最终母板拟合直线的参数值。

在定位焊趾特征点时,常用梯度法来计算,但是由于焊缝曲线(特别是在出现焊接缺陷时)变化的随

机性和不规律性,该方法的可靠性不高,如图 4(b)所示为梯度法求得的焊趾位置。本文提出了一种基于 K 均值聚类算法的焊趾特征点判断方法,其步骤如下:

1) 计算焊缝结构光中心线在 x 方向上的每个像素与前一个像素之间的 y 方向上的偏差,当发生偏差时,将该像素点的横坐标设为样本,组建成 m 个样本的数据集。图 5(a)、(b)所示为样本分布及其焊缝中心线。

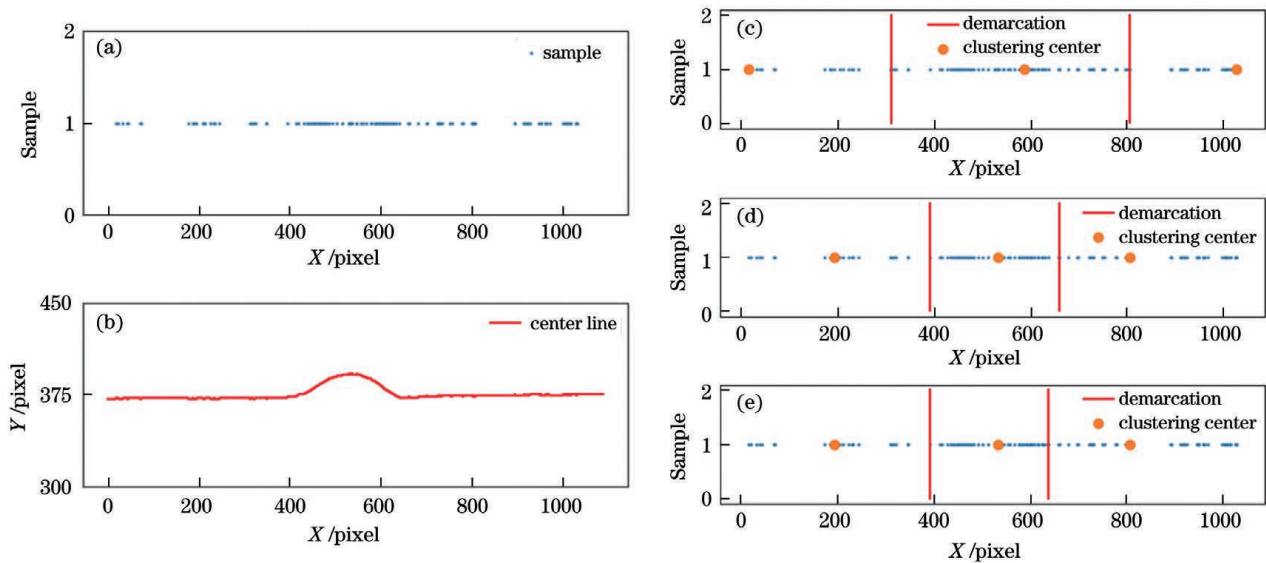


图 5 焊缝中心线上的样本分布及 K 均值聚类效果图。(a)样本分布;(b)原始焊缝中心线;(c)初始聚类中心;(d)最终聚类中心;(e)优化结果

Fig. 5 Sample distribution on weld center line and K-means clustering effect. (a) Sample distribution; (b) original weld centerline; (c) initial clustering center; (d) final clustering center; (e) optimized result

2) 设定 3 个类集,其聚类中心分别是 $C_j (j = 1, 2, 3)$,将第 1 个、第 $m/2$ 个和第 m 个样本作为初始聚类中心。

3) 对于每个样本,将横坐标的差值作为它们之间的距离,计算每个样本到 3 个聚类中心的距离,计算公式为

$$D(s_i, C_j) = \sqrt{(s_i - C_j)^2}, \quad (3)$$

式中: s_i 为样本; $D(s_i, C_j)$ 为样本 s_i 与聚类中心 C_j 之间的欧氏距离。再将每个样本分到距离其最近的聚类中心所对应的类中,在第 2 类集最边缘两侧的样本所在位置设置分界线,最终的分界位置即为焊趾特征点所在位置。图 5(c)所示为初始的聚类中心和分界线。

4) 计算每个类中所有样本的重心,以重心横坐标作为新的聚类中心。重心计算公式为

$$C'_j = \sum_{i=0}^{k_j} \frac{S_{k_i}}{k_j}, \quad (4)$$

式中: k_j 为第 j 类集的样本数量; S_{k_j} 为相应类集的样本值,即样本对应的横坐标。

5) 重复步骤 3) 和 4),直至聚类中心不再发生变化,将第 2 类集中的第一个样本和最后一个样本所在像素点作为预设特征点 P 、 Q 。

经过重复实验发现,不是所有的预设特征点都在最合适的位置上,如图 5(d)所示。因此本文设定了两个验证标准来优化特征点的提取准确度。第一个验证

标准是以某样本为中心左右各 10 pixel 范围内样本的密度是否大于 15, 样本密度 D 的计算公式为 $D = n / 20$ (n 为计算范围内的样本数量), 当 $D > 0.15$ 时, 第一个验证标准通过。第二个验证标准是样本周围两点所成直线的斜率的绝对值是否大于 0.2, 斜率绝对值 k 的计算公式为

$$k = \left| \frac{y_0 - y_1}{x_0 - x_1} \right|, \quad (5)$$

式中: (x_0, y_0) 为该样本中心左侧 10 pixel 位置处像素点的坐标; (x_1, y_1) 为该样本中心右侧 10 pixel 位置处像素点的坐标。当 $k > 0.2$ 时, 第二个验证标准通过。

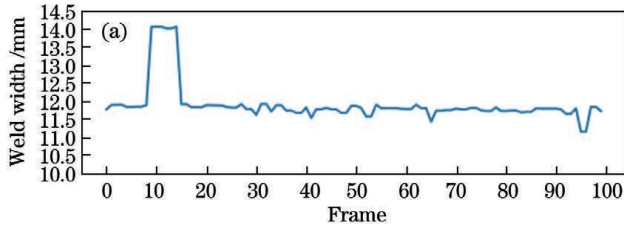


图 5(e) 所示为验证通过后的聚类中心分界线。

当两个验证条件均通过时, 两个样本所在像素点的位置 (x_p, y_p) 和 (x_q, y_q) 即为焊趾特征点所在位置; 当 $P(Q)$ 特征点样本未通过时, 选择下(上)一个位置的样本作为特征点 $P(Q)$ 样本, 重复以上过程, 直至验证通过。图 4(c) 所示为焊趾位置提取结果。图 6(a)、(b) 分别为梯度法和 K 均值聚类算法提取的焊缝宽度的对比, 可以看出 K 均值聚类算法的提取结果更准确且更稳定。通过计算得到焊趾点两侧的中心线数据点与母板拟合直线的平均残差小于 0.002, 验证了母板直线拟合的可靠性。

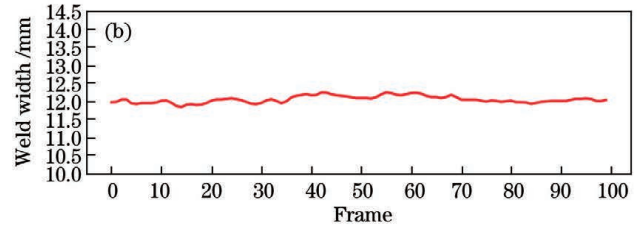


图 6 不同方法提取焊缝宽度的对比。(a) 梯度法; (b) K 均值聚类算法

Fig. 6 Comparison on weld width extracted by different methods. (a) Gradient method; (b) K-means clustering algorithm

为了验证焊缝宽度与高度检测的准确性和鲁棒性, 采用两种方式进行数据采集, 即在焊缝上任意取 30 个位置各采集一次数据以及在同一位置采集 20 次数据。分别利用自动检测方法和人工焊缝尺测量来采集焊缝的宽度和高度数据, 然后计算自动检测方法

与人工焊缝尺测量所得结果的平均偏差和均方差, 计算结果如表 1 所示。焊缝宽度误差小于 0.2 mm, 高度误差小于 0.1 mm, 宽度和高度重复测量误差均小于 0.02 mm, 说明本文所提焊缝自动检测方法可以满足实际应用中的精度要求。

表 1 焊缝宽度和高度的平均偏差和均方差

Table 1 Average deviation and mean square deviation of weld width and height

Parameter	Mean deviation /mm		Mean square deviation		
Width	Various locations	0.1137 (K-means clustering)	0.3457 (gradient method)	0.0171 (K-means clustering)	0.4368 (gradient method)
	Same location	0.0152 (K-means clustering)	0.0280 (gradient method)	0.0003 (K-means clustering)	0.0009 (gradient method)
Height	Various locations	0.0754		0.0058	
	Same location	0.0090		0.0001	

3 三维重建与光照模型

对焊缝图像预处理后提取出焊缝中心线的数据信息, 利用该信息建立三维光照模型。综合焊缝整体结构对焊缝质量进行分析, 相较于单一轮廓线具有高效、

准确的优势, 可减少缺陷的漏检和误检^[14-17]。

本文根据连续焊缝中心线数据来构建焊缝的三维光照模型。相较于仅包含数据信息的点云模型 [图 7(a)], 三维光照模型以相邻数据间组成的三角形面为基本单位, 以面法向量为面基本方向, 结合增设的

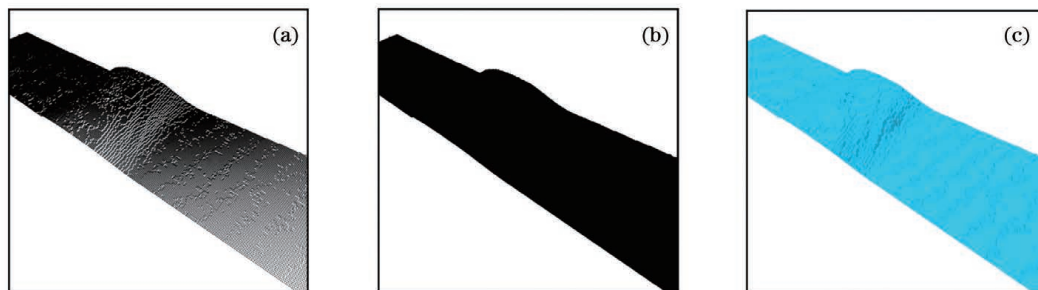


图 7 焊缝三维模型。(a) 点云模型; (b) 形状组装; (c) 三维光照模型

Fig. 7 Three-dimensional weld model. (a) Point cloud model; (b) shape assembly; (c) three-dimensional illumination model

假设光照为三维模型增加了光照信息。焊缝光照模型建立步骤如下：

1) 组建三维模型。在焊缝中心线的连续帧之间,分别以其中一帧的两个连续数据和邻近帧的最邻近数据(共三个数据)作为三角形的三个顶点组合成一个三角面,通过连续组合,最终组合成封闭的组

合面,构成形状组装的三维组装模型。图 7(b)为组装效果图。

2) 计算三维模型各组合面的法向量。单个三角面法向量的计算方法:假设拟合三角形的三个顶点坐标为 $T_1(x_{t_1}, y_{t_1}, z_{t_1})$ 、 $T_2(x_{t_2}, y_{t_2}, z_{t_2})$ 和 $T_3(x_{t_3}, y_{t_3}, z_{t_3})$, 计算三点的法向量 \mathbf{V}_n , 计算公式为

$$\mathbf{V}_n = \begin{vmatrix} \mathbf{i} & \mathbf{j} & \mathbf{k} \\ x_{t_2} - x_{t_1} & y_{t_2} - y_{t_1} & z_{t_2} - z_{t_1} \\ x_{t_3} - x_{t_1} & y_{t_3} - y_{t_1} & z_{t_3} - z_{t_1} \end{vmatrix} = (a_1, b_1, c_1), \quad (6)$$

其中 $a_1 = (y_{t_2} - y_{t_1})(z_{t_3} - z_{t_1}) - (y_{t_3} - y_{t_1})(z_{t_2} - z_{t_1})$, $b_1 = (z_{t_2} - z_{t_1})(x_{t_3} - x_{t_1}) - (z_{t_3} - z_{t_1})(x_{t_2} - x_{t_1})$, $c_1 = (x_{t_2} - x_{t_1})(y_{t_3} - y_{t_1}) - (x_{t_3} - x_{t_1})(y_{t_2} - y_{t_1})$ 。利用该公式计算所有组合面的法向量。

3) 建立光照模型。整个三维光照模型的光照系统主要包含三个部分,分别是环境光、漫反射光和镜面反射光。环境光 L_A 的计算公式为

$$L_A = A_c A_i K_a, \quad (7)$$

式中: A_c 为环境光颜色; A_i 为环境光强度; K_a 为环境光反射系数。

对于漫反射光,假设某入射光为 $\mathbf{V}_1 = (a_2, b_2, c_2)$, 则入射光 \mathbf{V}_1 与法向量 \mathbf{V}_n 的夹角为

$$\theta = \arccos\left(\frac{a_1 a_2 + b_1 b_2 + c_1 c_2}{\sqrt{a_1^2 + b_1^2 + c_1^2} \times \sqrt{a_2^2 + b_2^2 + c_2^2}}\right). \quad (8)$$

由于光照强度可能会为负值,故当入射光 \mathbf{V}_1 与法向量 \mathbf{V}_n 的夹角大于 90° 时,漫反射强度值为 0。该入射光的漫反射光 L_d 的计算公式为

$$L_d = \begin{cases} L_c L_i \cos \theta, & -90^\circ \leq \theta \leq 90^\circ \\ 0, & 90^\circ \leq |\theta| \end{cases}, \quad (9)$$

式中: L_c 为光线颜色; L_i 为光线强度。最终的漫反射光 L_D 为

$$L_D = \sum L_d K_d, \quad (10)$$

式中: K_d 为漫反射系数。

对于镜面反射,其最终的视角与观察角度相关。设视线向量为 $\mathbf{V}_v = (a_3, b_3, c_3)$ 并且半角向量为 $\mathbf{S}_h = (a_4, b_4, c_4)$, 半角向量 \mathbf{S}_h 由入射光 \mathbf{V}_1 和视线向量 \mathbf{V}_v 相加再归一化后得到,即:

$$\mathbf{S}_h = \frac{\mathbf{V}_1 + \mathbf{V}_v}{\|\mathbf{V}_1 + \mathbf{V}_v\|}. \quad (11)$$

其中 $a_4 = \frac{a_2 + a_3}{\sqrt{(a_2 + a_3)^2 + (b_2 + b_3)^2 + (c_2 + c_3)^2}}$,

$$b_4 = \frac{b_2 + b_3}{\sqrt{(a_2 + a_3)^2 + (b_2 + b_3)^2 + (c_2 + c_3)^2}},$$

$$c_4 = \frac{c_2 + c_3}{\sqrt{(a_2 + a_3)^2 + (b_2 + b_3)^2 + (c_2 + c_3)^2}}.$$

半角向量 \mathbf{S}_h 与法向量 \mathbf{V}_n 的夹角 γ 为

$$\gamma = \arccos\left(\frac{a_1 a_4 + b_1 b_4 + c_1 c_4}{\sqrt{a_1^2 + b_1^2 + c_1^2} \sqrt{a_4^2 + b_4^2 + c_4^2}}\right), \quad (12)$$

故该入射光镜面反射强度 L_s 的计算公式为

$$L_s = L_c L_i \cos^n(\gamma), \quad (13)$$

式中: n 为镜面反射光会聚指数。最终的镜面反射光 L_S 为

$$L_S = \sum L_s K_s, \quad (14)$$

式中: K_s 为镜面反射系数。

漫反射光和镜面反射光还会受光照衰减的影响。光照衰减的大小与设定的相关衰减常量以及物体到光源的距离有关,衰减因子 ϵ_a 的计算公式为

$$\epsilon_a = \frac{1}{C_d + C_l D + C_s D^2}, \quad (15)$$

式中: C_d 为距离衰减常量; C_l 为线性衰减常量; C_s 为二次衰减常量; D 为物体到光源的距离。

最终的光照强度 L 的计算公式为

$$L = L_A + \epsilon_a (L_D + L_S). \quad (16)$$

图 7(c)为最终的光照模型效果图。

4 焊缝质量评定

无缺陷焊缝和有缺陷焊缝在不同方向的定向光照下的亮度会有所不同。在相同的光照下,影响亮度值的最大因素是光照角度与焊缝各基本组合面法线的夹角,夹角越大,该组合面处的亮度越小。在母板平面法线方向的光照下,无缺陷焊缝的各组合面与光照方向的夹角较小,焊缝表面呈现出了颜色较淡的暗区域;而有缺陷焊缝由于在三维上出现了对平面较为明显的组合面方向变化,因此会出现颜色较深的暗区域斑块。当光照方向沿焊缝两侧变化时,对于无缺陷焊缝,光照变化侧的焊缝组合面与光照方向的夹角减小,暗区域颜色减淡,光照变化对侧的夹角增大,出现较为明显的暗区域;对于有缺陷的焊缝,现象同上,并且有缺陷处的暗区域斑块的颜色也会在一侧更深而在另一侧变淡,不同的缺陷会呈现出不同的暗区域斑块特征。因此,依据亮度值的强弱及分布,可以判断焊缝的质量。

人为制备了无缺陷焊缝以及存在咬边和气孔的焊缝,如图 8 所示,其母材均为 45 钢,焊接工艺均为熔化

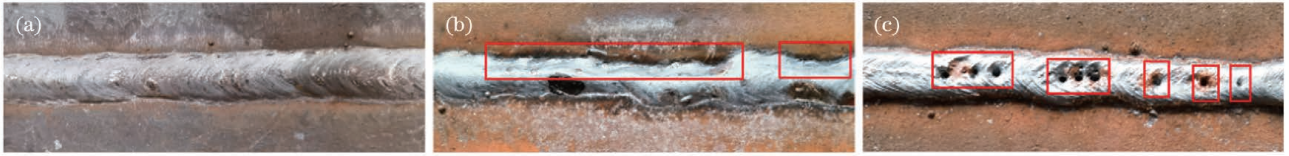


图 8 三种焊缝的原始图像。(a)无缺陷焊缝;(b)咬边焊缝;(c)气孔焊缝

Fig. 8 Original images of three welds. (a) Flawless weld; (b) weld with undercut; (c) weld with porosity

极活性气体保护电弧焊(MAG 焊)。

在构建焊缝的三维光照模型时,分别以垂直于焊缝以及与母材呈 45°角方向投射定向光线,建立光照模型。利用光照模型采集亮度的强弱和分布,获得亮度值分布状态图(图 9 中的光照方向选择的是咬边对侧),如图 9(a)、(d)、(g)所示。由于三维重建焊缝的亮度本身具有一定的噪声,因此首先对获得的亮度值进行中值滤波处理,以消除噪声干扰。如图 9(b)、

(e)、(h)所示,中值滤波处理后获得了亮度的初步特征,可以发现无缺陷焊缝的特征是仅有一块暗区域。然后对图像进行二值化处理,以凸显图像特征,处理结果如图 9(c)、(f)、(i)所示。将图像的暗区块作为特征区块,将特征区块的数量设为特征值 N ,并利用轮廓检测来获得 N 值。当 $N=1$ 时,图像被标记为无表面缺陷焊缝;当 $N \geq 2$ 时,图像被标记为有表面缺陷的焊缝。

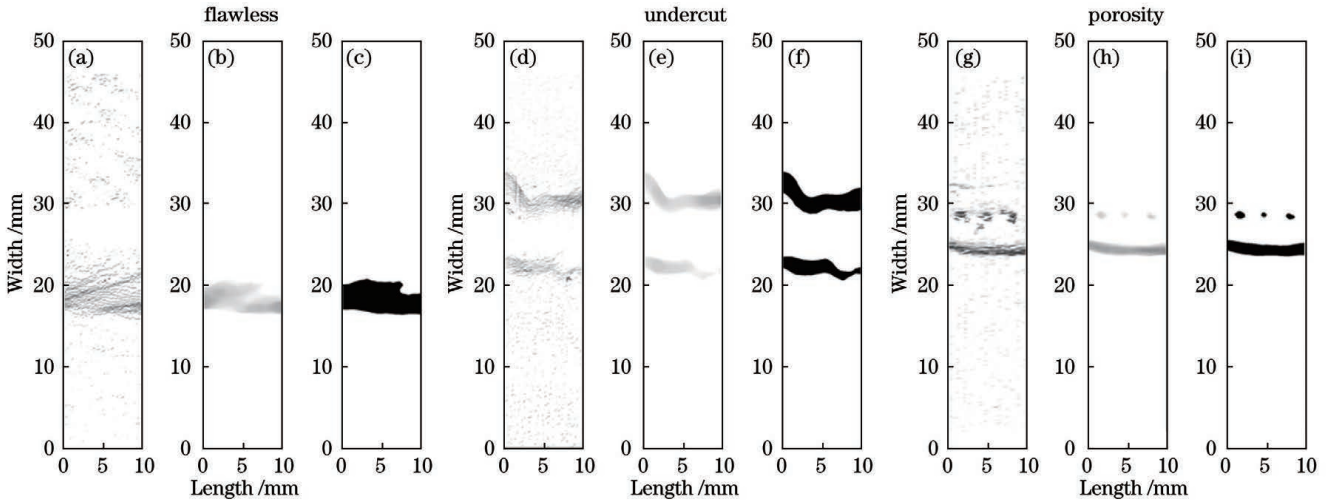


图 9 特征提取。(a)(d)(g)光照模型采集的亮度分布状态;(b)(e)(h)中值滤波结果;(c)(f)(i)二值化结果

Fig. 9 Feature extraction. (a)(d)(g) Intensity distributions collected by illumination model; (b)(e)(h) results after median filter; (c)(f)(i) results after binaryzation

对于有表面缺陷的焊缝,本文计算了特征区块的圆度。计算公式为

$$R_c = 1.4111 \left(\frac{D_p}{\sqrt{\frac{\sum [\sqrt{(x_k - x_c)^2 - (y_k - y_c)^2} - D_p]}{F}]^{0.4724}}} \right), \quad (17)$$

其中,

$$D_p = \frac{\sum \sqrt{(x_k - x_c)^2 - (y_k - y_c)^2}}{F}, \quad (18)$$

式中: (x_k, y_k) 为轮廓像素点, $k = 1, 2, 3, \dots$; (x_c, y_c) 为特征区块的质心坐标; F 为轮廓面积; D_p 为轮廓点到轮廓中心的平均距离; R_c 为圆度。

设定圆度阈值 $R_{c_limit} = 0.6$ 。当圆度大于圆度阈值时,将焊缝缺陷分类为气孔;当圆度小于圆度阈值时,将焊缝缺陷分类为咬边。在图 9(f)中,圆度为 $R_{c_f_1} = 0.31 < R_{c_limit}$, $R_{c_f_2} = 0.34 < R_{c_limit}$;在图 9(i)中,圆度为 $R_{c_i_1} = 0.33 < R_{c_limit}$, $R_{c_i_2} = 0.76 > R_{c_limit}$,

$R_{c_i_3} = 0.74 > R_{c_limit}$, $R_{c_i_4} = 0.76 > R_{c_limit}$ 。

接下来以 ISO 5817:2003 标准作为依据,对分类的咬边缺陷焊缝进行再次验证。根据 ISO 5817:2003 标准,咬边缺陷判定的极限尺寸为焊缝高度低于母材 1 mm,气孔缺陷的判定为气孔存在。

本文根据分类为咬边缺陷的区块内的焊缝高度值来验证焊缝是否为缺陷焊缝。以拟合焊缝母板直线的高度为标准,将低于母板直线 1 mm 的像素值定为咬边缺陷的特征像素。特征区块内咬边缺陷特征像素占该特征区块内所有像素的比例为

$$S = \frac{m}{n}, \quad (19)$$

式中： m 为咬边缺陷特征像素个数； n 为总像素个数。

设定阈值 $S_{\text{limit}}=0.2$ ，计算低于 1 mm 像素所占比例，可以获得两个区块内的比例分别为 $S_1=0$ 和 $S_2=0.626$ ，其中的 $S_2 > S_{\text{limit}}$ ，因此最终验证 S_2 区域内存在咬边。

测试了 80 组数据(无缺陷焊缝和咬边焊缝各 30 组，气孔焊缝 20 组)，计算自动检测的各项特征值以及最终缺陷分类的准确度。由表 2 可知：在对有无缺陷进行分类时，焊缝分类准确度为 1；在对具体缺

陷进行分类时，咬边和气孔缺陷的分类准确度都在 0.95 以上。无缺陷焊缝的数量特征值 $N=1$ ，有缺陷焊缝的数量特征值 $N \geq 2$ 。气孔缺陷焊缝的数量特征值 $N \geq 2$ ，圆度特征值 R_c 为 0.3~0.5(气孔缺陷部分)或大于 0.7(非缺陷部分)；咬边缺陷焊缝的数量特征值 $N \geq 2$ ，圆度特征值 R_c 在 0.3~0.5 之间，咬边特征值 S 在 0.5~0.8 之间(咬边缺陷部分)或为 0(非缺陷部分)。自动分类结果符合对应的分类阈值。

表 2 焊缝缺陷自动分类分析

Table 2 Automatic classification analysis of weld defects

Weld type	N	R_c	S	Accuracy
Flawless weld	1			1
Flaw weld	≥ 2			1
Undercut weld	≥ 2	0.3~0.5	0 (area without defects) 0.5~0.8 (area with undercut defect)	0.967
Porosity weld	≥ 2	0.3~0.5 (area with porosity defect) >0.7 (area without defects)		0.95

5 结 论

本文使用 K 均值聚类算法提取焊趾特征点，提高了特征点的提取准确度，提取出了包括余高、熔宽的焊接参数。同时，本文依据焊缝中心线数据建立了三维光照模型，根据光照模型亮度数据标定了暗部区块特征，实现了无缺陷焊缝和咬边焊缝、气孔焊缝的自动分类。

未来拟将利用不同光照算法下焊缝亮度的不同呈现效果，实现更多种缺陷焊缝的自动分类，同时结合二维特征信息实现焊缝缺陷面积、体积等具体参数信息的自动提取。

参 考 文 献

[1] 韩家杰, 周建平, 薛瑞雷, 等. 线结构光管道焊缝表面形貌重建与质量评估[J]. 中国激光, 2021, 48(14): 1402010.
Han J J, Zhou J P, Xue R L, et al. Surface morphology reconstruction and quality evaluation of pipeline weld based on line structured light[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(14): 1402010.

[2] 郭吉昌, 朱志明, 于英飞, 等. 焊接领域激光结构光视觉传感技术的研究及应用[J]. 中国激光, 2017, 44(12): 1200001.
Guo J C, Zhu Z M, Yu Y F, et al. Research and application of visual sensing technology based on laser structured light in welding industry[J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(12): 1200001.

[3] 赵军, 赵继, 张雷. 焊缝结构光图像处理与特征提取方法[J]. 西安交通大学学报, 2013, 47(1): 114-119.
Zhao J, Zhao J, Zhang L. Image processing and feature extraction for structured light images of welded seam [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2013, 47(1): 114-119.

[4] 徐德, 赵晓光, 涂志国, 等. 基于结构光立体视觉的焊缝测量[J]. 焊接学报, 2004, 25(5): 45-48, 52.
Xu D, Zhao X G, Tu Z G, et al. Automated measurement of weld seam based on structured light stereovision [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2004, 25(5): 45-

48, 52.

[5] 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 W J, Xu M. Research on structured light visual inspection system for weld of tailored blanks laser welding[J]. Machinery Design & Manufacture, 2011(3): 156-158.

[6] 张佳. 基于线结构光的焊缝特征尺寸视觉检测系统研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2020.
Zhang J. Research on visual inspection system for weld feature size based on line structured light [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2020.

[7] 李玉. 基于结构光视觉的焊缝外观检测[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2019.
Li Y. Weld appearance inspection based on structured light vision [D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2019.

[8] Zhu H Y, Lu Y H, Li Y L, et al. Method for detecting weld feature size based on line structured light[J]. Transactions of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2021, 38(3): 383-392.

[9] Huang W, Kovacevic R. A laser-based vision system for weld quality inspection[J]. Sensors, 2011, 11(1): 506.

[10] 丁晓东. 焊缝表面成形激光视觉在线测量及质量评估[D]. 广州: 广东工业大学, 2018.
Ding X D. Online measurement and quality assessment of weld surface forming based on laser vision[D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2018.

[11] 李伟明, 彭国, 高兴宇, 等. 线激光光条中心快速提取算法[J]. 中国激光, 2020, 47(3): 0304002.
Li W M, Peng G, Gao X Y, et al. Fast extraction algorithm for line laser strip centers[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(3): 0304002.

[12] Tian Q G, Zhang X Y, Ma Q, et al. Utilizing polygon segmentation technique to extract and optimize light stripe centerline in line-structured laser 3D scanner [J]. Pattern Recognition, 2016, 55: 100-113.

[13] 李莹莹, 张志毅, 袁林. 线结构光光条中心提取综述[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(10): 100002.
Li Y Y, Zhang Z Y, Yuan L. Survey on linear structured light stripe center extraction[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(10): 100002.

[14] 曹天池, 李秀实, 李丹, 等. 基于图像分解的光照估计算法[J].

- 计算机工程与科学, 2021, 43(8): 1422-1428.
- Cao T C, Li X S, Li D, et al. Illumination estimation based on image decomposition [J]. Computer Engineering & Science, 2021, 43(8): 1422-1428.
- [15] 黄三傲, 李明, 徐科, 等. 基于近场 LED 点光源光度立体的核电设备表面缺陷三维检测[J]. 核动力工程, 2021, 42(4): 191-197.
- Huang S A, Li M, Xu K, et al. Surface defect detection on nuclear power plant components based on photometric stereo under near-field LED light [J]. Nuclear Power Engineering, 2021, 42(4): 191-197.
- [16] 张博文. 基于光度信息的三维数字化研究与实现[D]. 西安: 陕西科技大学, 2019.
- Zhang B W. Study and implementation of 3D digitization based on photometric information [D]. Xi'an: Shaanxi University of Science & Technology, 2019.
- [17] 杨鹏斌, 邓林嘉, 陈元, 等. 基于结构光的高反物体三维形貌测量方法[J]. 中国激光, 2019, 46(2): 0204004.
- Yang P B, Deng L J, Chen Y, et al. Three-dimensional shape measurement of highly reflective objects based on structured light [J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(2): 0204004.

Weld Surface Quality Detection Based on Structured Light and Illumination Model

Yu Jiajie, Zhou Jianping*, Xue Ruilei**, Xu Yan, Xia Lei

College of Mechanical Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830049, Xinjiang, China

Abstract

Objective Visual inspection method based on structured light has the advantages of simple structure, low-cost, and high-precision, so it is widely used in weld seam tracking and quality inspection. This method can be used to realize the automatic detection of weld surface quality, in order to improve the welding quality and realize the intelligent production of the welding industry. Currently, the research on weld quality detection based on structured light mainly focuses on single frame image detection. It is still a difficult problem to realize weld quality detection and automatic classification of defects in a three-dimensional state. Compared with the two-dimensional image information, the three-dimensional model information is more sufficient and intuitive, so the quality test results based on it have the characteristics of credibility, higher accuracy, and better stability. Additionally, the weld toe points of a two-dimensional image have the defects of low extraction accuracy and are prone to deviation. Given the above problems, this paper proposes a weld surface quality detection method that combines a K-means clustering algorithm and an illumination model. The proposed method can enhance welding automation production.

Methods To eliminate the noise interference in the image, Gaussian filtering, threshold segmentation, and region-of-interest extraction were used to preprocess the weld image (Fig. 2), and the centroid method was used to extract the centerline of the structured light weld. The template line was fitted by the iterative least square method, and the height feature points were calculated to correct the installation error of the base metal. Considering the change of pixels in the weld centerline as the sample of the K-means algorithm, three class sets were set, and the distance between the sample and the clustering center was used to cluster. The center of gravity of the class set was calculated as a new clustering center, which was iterative until the clustering center remained unchanged. The coordinate points on both sides of the middle-class set of the final result were used as the preset weld toe feature points, and then, the sample density and absolute value of the slope at the feature point were calculated to verify the weld toe feature point pair results. The weld width and height were calculated according to the obtained feature points and the parent plate straight line. The three-dimensional model of the weld was constructed based on the centerline data of the continuous weld, and then, the light intensity of the weld model was calculated according to the illumination algorithm to obtain the illumination model of the weld. The characteristics of the dark area plaque and the related eigenvalues were established according to the intensity and distribution of the brightness value of the weld under directional illumination. The eigenvalues were used to classify whether the weld had defects and specific defects (undercut and porosity).

Results and Discussions During the extraction of weld toe feature points, the accuracy of feature points extraction is improved by the extraction method of weld toe feature points based on K-means clustering. The width error is less than 0.2 mm, the height error is less than 0.1 mm, and repeated measurement errors of the width and height are less than 0.02 mm (Table 1). Compared with the gradient method, the weld toe feature points extracted based on K-means clustering are more accurate and stable (Fig. 6), which can meet the accuracy error in practical application. When the defects are classified based on the illumination model, the following properties are set: the number characteristic value N of the dark block, the roundness characteristic value R_a of the dark block, and the undercut characteristic value S . The characteristic value N of the defect-free weld is equal to 1, the characteristic value N of the defect weld is greater than or

equal to 2, the roundness characteristic value R_c of the porosity weld is greater than 0.7 (area without defects) or between 0.3 and 0.5 (area with porosity defect), the undercut characteristic value S is between 0.5 and 0.8 (area with undercut defect) or 0 (area without defects). For the classification of defects, the accuracy of the weld classification is 1. When classifying specific defects, the classification accuracy of undercut weld and porosity weld is above 0.95 (Table 2). Our method has a good classification effect.

Conclusions The K-means clustering algorithm was used to extract the weld toe feature points, which improved the extraction accuracy of weld toe feature points and extracted the welding parameters, including height and width of the weld. Furthermore, a three-dimensional illumination model was established according to the centerline data of the weld. Additionally, the characteristics and eigenvalues of the dark block were calibrated, and the automatic classification of the weld with or without defects and specific defect types (undercut and porosity) was realized according to the illumination brightness data of the illumination model.

Key words laser technique; weld surface quality detection; image processing; illumination model; machine vision