

# 基于本征图像分解的焊缝提取算法

纪象民<sup>1</sup>,曹志峰<sup>1</sup>,任传鹤<sup>2</sup>,王延东<sup>3</sup>

(1. 东营市特种设备检验研究院,东营 257000;2. 济宁鲁科检测器材有限公司,济宁 272000;  
3. 山东省特种设备检验研究院济宁分院,济宁 272100)

**摘要:** 基于被动式视觉传感器的焊缝提取算法受自然光照等条件的制约,发展较为缓慢。针对这一问题,提出了一种基于本征图像分解的焊缝提取算法。首先,通过预处理抑制原始焊缝图像中的噪声;其次,基于梯度稀疏先验,将预处理图像分解为前景图层和背景图层,其中,前景图层仅包含图像边缘等结构信息,背景图层中则包含光照等平滑信息;最后,对前景图层进行 Gamma 变换,增强焊缝区域特征,削弱光照条件对算法的影响。试验结果表明,该算法满足检测的准确度和实时性要求,达到了辅助爬壁机器人定位焊缝位置的目的。

**关键词:** 本征图像分解;梯度稀疏先验;Gamma 变换;焊缝定位

中图分类号: TG115.28 文献标志码: A 文章编号: 1000-6656(2023)02-0033-06

## Weld seam extraction algorithm based on intrinsic image decomposition

JI Xiangmin<sup>1</sup>, CAO Zhifeng<sup>1</sup>, REN Chuanhe<sup>2</sup>, WANG Yandong<sup>3</sup>

(1. Dongying Special Equipment Inspection and Research Institute, Dongying 257000, China;  
2. Jining Luke Testing Equipment Co., Ltd., Jining 272000, China;  
3. Shandong Special Equipment Inspection and Research Institute Jining Branch, Jining 272100, China)

**Abstract:** Due to the constraints of natural lighting and other conditions, the development of weld seam extraction algorithms based on passive vision sensors is relatively slow. Aiming at this problem, this paper proposes a welding seam extraction algorithm based on intrinsic image decomposition. Firstly, the noise in the original weld image is suppressed by preprocessing, and secondly, the preprocessed image is decomposed into foreground and background layers based on gradient sparse prior. Among them, the foreground layer only contains structural information such as image edges, while the background layer contains smooth information such as lighting. Finally, Gamma transform is performed on the foreground layer to enhance the characteristics of the weld area and weaken the influence of lighting conditions on the algorithm. The experimental results show that the algorithm meets the requirements of the accuracy and real-time performance, and achieves the purpose of assisting the wall-climbing robot to locate the weld position.

**Key words:** intrinsic image decomposition; gradient sparse prior; Gamma transform; weld locating

随着机器人以及计算机视觉技术的不断发展,爬壁机器人作为机器人的一个重要分支,具有可在倒立面或垂直面进行移动的特点,广泛应用于高空

大型设备的制造、检测、维保等场景中。近年来,众多学者在爬壁机器人的结构设计、吸附技术、运动控制等方面进行了大量研究,研制出了可用于高层建筑外墙清洗、大型储罐设备表面检测、大型设备焊接的机器人。焊接领域的爬壁机器人除了能够吸附于垂直面或倒立面外,还能够通过提取焊缝路径修正运动方向<sup>[1-3]</sup>。

基于视觉的焊缝提取算法主要分为:基于主动式视觉传感器的提取算法<sup>[4-6]</sup>和基于被动式视

收稿日期:2022-07-22

作者简介:纪象民(1968—),男,硕士,高级工程师,主要从事特种设备检验检测、质量管理以及科研研发等工作

通信作者:任传鹤,18840837927@163.com

觉传感器的提取算法<sup>[7-12]</sup>。基于主动式视觉传感器的方法主要依靠外部光源引导, 通过分析外部光源的反射图像特征, 间接提取出焊缝的位置信息。该方法能够有效抑制场景中不均匀光照对识别算法的影响。其算法处理较为简便可靠, 但系统总体成本较高。针对不同焊接场景, 所采用外部光源的类型有所不同, 焊缝提取算法也存在较大差异。XIAO 等<sup>[4]</sup>利用单线激光传感器组成三线激光传感器, 并作为外部光源, 解决了单线激光传感器对曲线焊缝的误识别问题。KIDDEE 等<sup>[5]</sup>利用“十”字激光传感器作为外部光源, 增加了反射图像中焊缝特征点的个数, 提高了不同类型焊缝的识别精度。ZHANG 等<sup>[6]</sup>基于时空级联的隐马尔可夫模型, 结合反射图像中激光条纹的空间特性, 提出了一种室外焊缝提取算法, 大大提高了室外焊缝定位的精度。

被动式方法直接利用焊缝图像自身的反射光作为光源, 并根据反射图像信息提取焊缝特征, 从而完成焊缝的定位。该方法无需借助外部光源引导, 体积较小, 成本较低, 更适用于中小型爬壁机器人, 但其易受自然光照影响, 算法处理难度较大。莫玲等<sup>[7]</sup>提出了一种基于图像增强技术的焊缝提取算法, 并对比了直方图均衡化和小波变换算法的增强效果, 结果显示小波变换算法更适用于对焊缝区域的增强。刘涛等<sup>[8]</sup>采用 Gamma 变换对焊缝图像进行增强, 显著提高了图像低灰度区域的直线特征。

自然光照条件是影响被动式算法性能的关键因素, 不同光照条件下, 焊缝区域图像特征存在差异。为此, 提出一种基于本征图像分解的焊缝提取算法并进行了试验。试验结果表明, 该算法满足准确度和实时性的要求, 达到了辅助爬壁机器人定位焊缝位置的目的。

## 1 焊缝图像预处理

原始焊缝图像的目标焊缝位置如图 1 所示, 可



图 1 原始焊缝图像的目标焊缝位置

以看出, 原始焊缝图像中含有较多的干扰信息, 有效信息量少, 信噪比低。为便于进一步提取焊缝特征, 需要对原始焊缝图像进行预处理, 尽可能降低噪声信息的影响, 提高图像信噪比。预处理流程图如图 2 所示。

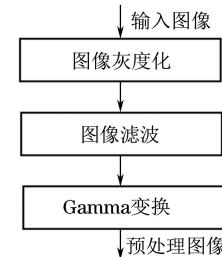


图 2 预处理流程图

由图 1 可以看出, 原始焊缝图像除明显的标记、划痕、间隙等无效信息外, 还含有大量的噪声信息。噪声信息不利于进一步对焊缝的提取处理, 因此, 需要采用滤波等方式将其滤除。由于焊缝图像中存在许多纹理信息, 采用传统的低通、均值滤波等图像处理方法, 会造成图像中有效信息的损失。为降低噪声信息的影响、保留图像的边缘信息, 笔者采用自适应中值滤波算法对焊缝图像进行处理。

相较于传统中值滤波方法, 自适应中值滤波采用可调尺寸的滤波窗口, 算法步骤具体分为两步。

(1) 令  $A_1 = Z_{\text{med}} - Z_{\min} - t$ ,  $A_2 = Z_{\text{med}} - Z_{\max} - t$ , 若  $A_1 > 0$  且  $A_2 < 0$ , 则执行步骤(2); 否则扩大窗口  $S_{xy}$  的范围。若  $S_{xy} \leq S_{\max}$ , 则重复执行步骤(1), 否则输出  $Z_{xy}$ 。其中,  $S_{xy}$  为以像素点  $(x, y)$  为中心的窗口;  $Z_{xy}$  为像素点  $(x, y)$  处的灰度,  $Z_{\max}$ ,  $Z_{\min}$ ,  $Z_{\text{med}}$  分别为窗口内像素灰度的最大值, 最小值以及中值;  $S_{\max}$  为窗口的最大范围;  $t$  为常数。

(2) 令  $B_1 = Z_{xy} - Z_{\min} - t$ ,  $B_2 = Z_{xy} - Z_{\max} - t$ , 若  $B_1 > 0$  且  $B_2 < 0$ , 则输出  $Z_{xy}$ , 否则输出  $Z_{\text{med}}$ 。

步骤(1)的目的是判断  $Z_{\text{med}}$  是否为噪声所在像素点, 而步骤(2)的目的是判断窗口的中心点  $Z_{xy}$  是否为噪声所在像素点。若噪声范围较大, 则扩大窗口范围; 若窗口中心不是噪声点, 则保持当前灰度。试验表明, 该方法有效降低了原始焊缝图像中噪声信息的影响。

此外, 焊缝位置图像亮度较高, 而其他区域, 例如表面间隙区域, 虽存在明显的边界特征, 但其亮度相对较低。为进一步提高亮暗区域的对比度, 增强焊缝区域特征, 采用 Gamma 变换对滤波后的图像进行处理。变换后灰度图像可表示为

$$I(x, y) = [I_0(x, y)]^\gamma \quad (1)$$

式中:  $I_0(x, y)$  为原始焊缝图像;  $I(x, y)$  为伽马校正后的灰度图像;  $\gamma$  为校正系数, 且  $\gamma > 1$ 。

经过图像滤波以及 Gamma 变换后得到的预处理结果如图 3 所示。

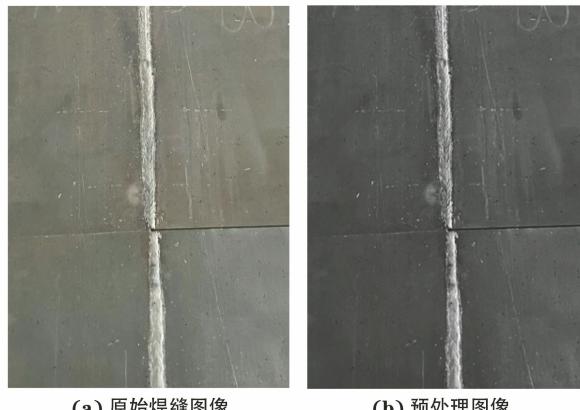


图 3 经滤波以及 Gamma 变换后得到的预处理结果

## 2 基于本征图像分解的焊缝提取算法

### 2.1 本征图像分解

本征图像分解的目的是将光照信息从原始图像中分离, 得到仅包含整体结构信息的图像, 并对该图

像做进一步处理, 削弱自然光照条件对算法的影响。焊缝提取算法流程如下: ① 对原始焊缝图像进行预处理, 抑制噪声信息的同时增强焊缝特征; ② 使用梯度稀疏先验将图像分解为前景图层和背景图层(前景图层仅包含图像边缘等大梯度信息, 背景图层则包含光照等平滑信息)。对前景图层进行 Gamma 变换, 进一步增强焊缝区域特征, 得到焊缝图; ③ 利用距离变换和水平、垂直投影得到焊缝骨架图, 并采用最小二乘法对骨架图进行直线拟合, 提取出焊缝路径。焊缝提取算法流程如图 4 所示。

本征图像分解旨在将观测图像分解为反射图像和照度图像。该模型假设图像每个像素点都是场景中不同位置反射率以及照度的乘积, 即

$$I(x, y) = R(x, y) \cdot L(x, y) \quad (2)$$

式中:  $(x, y)$  为像素点坐标;  $I(x, y)$  表示场景中获取的图像;  $R(x, y)$  代表反射图像;  $L(x, y)$  为各位置的照度图像。

照度图像反映了场景中光照的变化, 故而照度图像较为光滑。反射图像反映了成像物体的纹理信息, 其梯度变化一般较大。对式(2)取对数, 有

$$\log I(x, y) = \log R(x, y) + \log L(x, y) \quad (3)$$

式中:  $\log$  表示广义对数变换, 将图像变换到对数域。

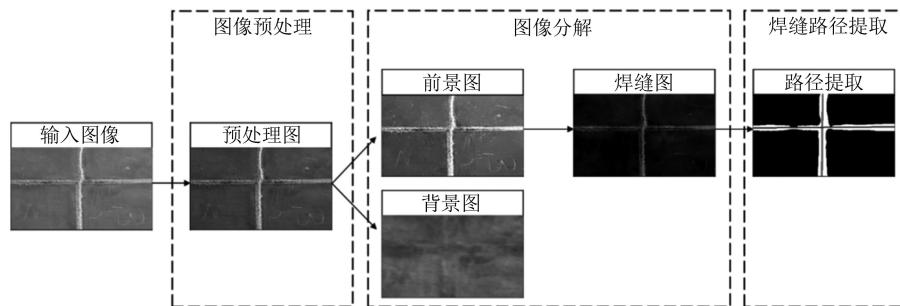


图 4 焊缝提取算法流程图

本征图像分解过程如图 5 所示。

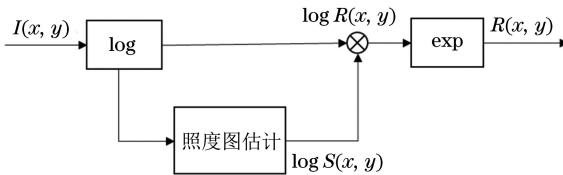


图 5 本征图像分解过程

图像梯度特征是否稀疏<sup>[13]</sup>, 是区分照度图像和反射图像的关键。对于照度图像, 可假设其近似为大量小梯度平滑信息构成的图层, 且该图层梯度呈短尾分布; 同理, 对于反射图像, 可假设其近似为大梯度信息构成的图层, 相对于照度图像, 该图层梯度大致呈长尾分布。因此, 照度图估计问题即可转变为基于梯

度稀疏先验的图像分解问题。

### 2.2 基于梯度稀疏先验的图像分解算法

在焊缝图像中, 大梯度信息主要包括焊缝、金属材料裂缝以及表面划痕等, 其所在图层称为前景图层。对于质地相同的均匀金属, 大梯度信息较少, 其所在图层称为背景图层。不同区域梯度直方图如图 6 所示, 上方蓝色方框近似代表背景图层, 下方蓝色方框近似代表前景图层, 右侧为两图层分别对应的梯度直方图。可知, 背景图层所含大梯度信息较少, 且直方图呈短尾分布。前景图层所含大梯度信息较多, 相较于背景图层, 其直方图近似呈长尾分布。

前景图层包含整体纹理信息, 而背景图像仅包含场景光照等信息, 这会导致背景图层平滑程度远远大

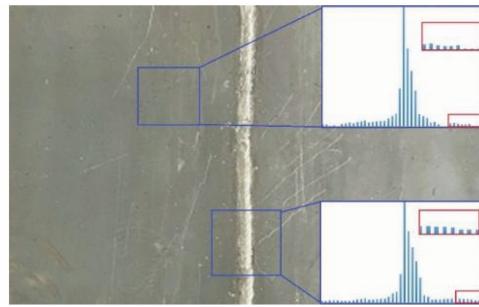


图 6 不同区域梯度直方图

于前景图层的。因此,可将输入预处理后的焊缝图像看作不同图层的组合,即

$$I(x, y) = I_1(x, y) + I_2(x, y) \quad (4)$$

式中: 定义  $I_1(x, y)$  为前景图层, 其中包含输入图像中的大梯度信息;  $I_2(x, y)$  为背景图层, 仅包含输入图像中的平滑信息。

同时, 依据梯度稀疏先验, 将上述图像分层问题描述为<sup>[14]</sup>

$$P_1(g) = \frac{1}{z} \max\{e^{-g^2/\sigma_1^2}, \epsilon\} \quad (5)$$

$$P_2(g) = \frac{1}{2\pi\sigma_2^2} e^{-g^2/\sigma_2^2} \quad (6)$$

式中:  $g$  为梯度值;  $z$  为归一化参数;  $\sigma_1$  和  $\sigma_2$  分别为两个较小的高斯分布方差;  $P_1(g)$  为梯度值属于前景图层的概率;  $P_2(g)$  为梯度值属于背景图层的概率。

为防止出现边缘概率为 0 的现象, 在式(5)中添加一个较小的常量  $\epsilon$  作为下限值。其次, 为了保证  $I_2(x, y)$  较为平滑, 需要最大化联合概率分布  $P(I_1, I_2)$ , 使得联合概率分布的负对数取得最小值。式(6)的负对数可以表示为

$$-\log P_2(g) \propto g^2/\sigma_2^2 + C_2 \quad (7)$$

将式(7)进行简化, 设稀疏惩罚函数  $\rho(g) = \min\{g^2/k, 1\}$ ,  $k$  为较小的常数, 则其负对数可以表示为

$$-\log P_1(g) \propto \min\left\{\frac{g^2}{\sigma_1^2(-\log \epsilon)}, 1\right\} + C_1 \quad (8)$$

式中:  $C_1, C_2$  为常数。

对于联合概率分布, 若假设两图层相互独立, 可以得到  $P(I_1, I_2) = P(I_1) \cdot P(I_2)$ , 同时假设各导数滤波器输出相互独立, 最小化联合概率分布的数学模型可以写为

$$\min_{I_1, I_2} \sum_{i, j} [\rho(I_1 * f_j)_i + \lambda(I_2 * f_j)_i^2] \quad (9)$$

式中:  $*$  表示卷积运算;  $i$  为像素坐标;  $j$  为导数滤波器的类型;  $f_j$  代表不同类型的导数滤波器;  $\lambda$  为调整  $I_2$  平滑度的参数;  $\rho$  为稀疏惩罚函数。

采用两个不同方向的一阶导数滤波器以及二阶拉普拉斯滤波器, 一阶导数滤波器的作用为恢复  $I_1$  中的纹理信息, 而拉普拉斯滤波器可以保证  $I_2$  的平滑, 将式(4)代入式(9), 消去  $I_2$ , 可以得到对  $I_1$  的优化目标函数。该优化目标函数为带有不等式约束条件的非凸函数, 可以采用半二次分裂方法<sup>[15]</sup> 将其转化为一定约束范围内的凸函数优化问题, 则有

$$\min_{I_1} \sum_i \left\{ \sum_{j=1,2} \rho(I_1 f_j)_i + \lambda [(I_1 f_3)_i - (I f_3)_i]^2 \right\} \\ s.t. lb_i \leq (I_1)_i \leq ub_i \quad (10)$$

式中:  $F_j^i I = (I * f_j)_i$ ,  $h_i^j$  为辅助变量;  $\beta$  为优化过程中逐步增大的权重系数, 其值越大, 越接近目标函数的精确解;  $I$  为原始图像;  $s.t.$  表示对  $I_1$  施加约束条件, 使其转化为局部的凸优化问题。

通过逐步迭代, 更新辅助变量参数并寻找  $I_1$  的最优解, 式(10)中辅助变量的更新过程以及  $I_1$  的求解过程如下。

(1) 保持  $I_1$  不变, 当式(10)取得最小值时, 计算各个位置的封闭解, 此时  $h_i^j$  可以写为

$$h_i^j = \begin{cases} F_j^i I_1, & (F_j^i I_1)^2 > \frac{1}{\beta} \\ 0, & \text{否则} \end{cases} \quad (11)$$

(2) 保持辅助变量  $h_i^j$  不变, 可以看出, 式(10)为关于  $I_1$  的二次函数。假设此时式(10)满足圆形边界条件, 利用二维 FFT 算子将卷积矩阵  $F^j$  对角化, 求解出  $I_1$  为

$$I_1 = \mathcal{F}^{-1}(A) \quad (12)$$

$$A = \frac{\beta \sum_j [\mathcal{F}(F^j)^* \mathcal{F}(h^j)] + \lambda \mathcal{F}(F^3)^* \mathcal{F}(F^3) \mathcal{F}(I)}{\beta \sum_j [\mathcal{F}(F^j)^* \mathcal{F}(F^j)] + \lambda \mathcal{F}(F^3)^* \mathcal{F}(F^3) + \tau} \quad (13)$$

式中:  $(\cdot)^*$  代表共轭操作;  $\mathcal{F}$  为二维 FFT 算子, 在分母添加接近于 0 的常数  $\tau$ 。

为保证非凸函数可以取得最优解, 需要满足计算出的  $(I_1)_i \in [lb_i, ub_i]$ , 因此要对  $I_1$  进行归一化操作, 计算公式为

$$\min_t \sum_i m_i [(I_1)_i + t - lb_i]^2 + \sum_i n_i [(I_1)_i + t - ub_i]^2 \quad (14)$$

式中:  $lb_i, ub_i$  分别为  $I_1$  在各个位置的上下限值;  $t$  为归一化系数;  $m_i, n_i$  为示性函数, 当  $(I_1)_i + t < lb_i$  时,  $m_i = 1$ , 当  $(I_1)_i + t > ub_i$  时,  $n_i = 1$ , 其他情况下示性函数取值为 0。根据式(11) ~ 式(14),

利用梯度下降法可求得落在合适取值范围的最优解  $I_1$ 。同时根据式(4), 计算出此时  $I_2$  的值。

算法按照以上步骤执行, 其输入为原始图像  $I$ , 平滑系数  $\lambda$ , 优化权重  $\beta$ , 权重增加系数  $\eta$ , 最大迭代次数  $n$ ; 输出为前景图层  $I_1$  和背景图层  $I_2$ 。

在原始焊缝图像中, 表面焊缝区域梯度变化相

对于其他区域更为剧烈, 因此前景图层焊缝区域对应的灰度值更大, 对得到的前景图层进行 Gamma 变换, 即可得到焊缝图。焊缝图像分解结果如图 7 所示。图 7(a)为预处理后的原始焊缝图, 图 7(b)为具有大梯度信息的前景图层, 图 7(c)为仅含平滑信息的背景图层, 图 7(d)为分解后得到的焊缝图。

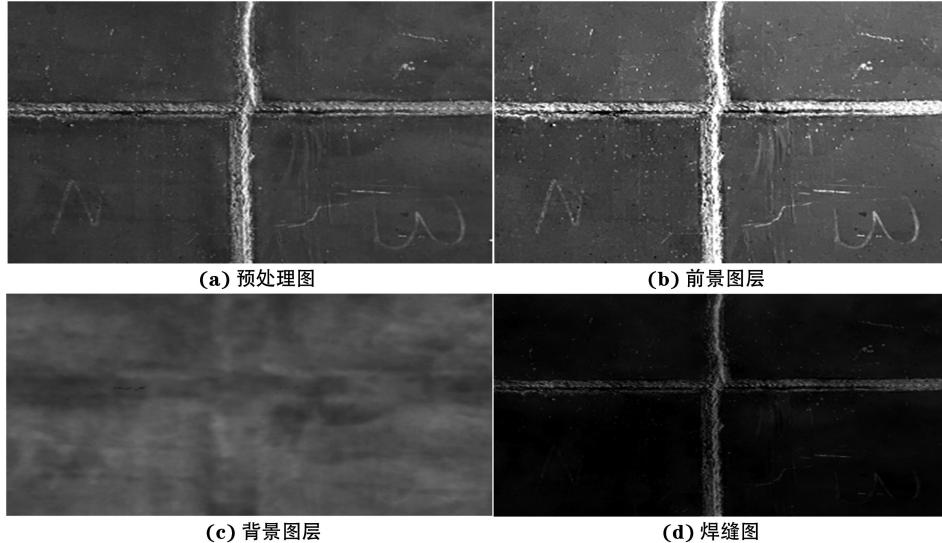


图 7 焊缝图像分解结果

### 3 焊缝路径提取

为进一步确定焊缝位置信息, 需要对焊缝图进行直线拟合, 以获取机器人相对于焊缝的位置。笔者采用基于权重的最小二乘法对焊缝位置进行提取。焊缝路径提取流程如图 8 所示。

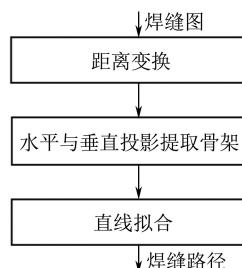


图 8 焊缝路径提取流程

焊缝路径提取流程具体表述为: ① 采用最大熵阈值对焊缝图进行分割得到二值化图像, 并对二值化图像进行距离变换; ② 对距离变换后得到的二值化图像进行水平和垂直投影; ③ 利用最小二乘法对焊缝骨架图像中的像素点进行拟合得到直线位置。其中, 最小二乘法目标函数可表示为

$$\min_{a,b} \sum_{i=1}^n [y_i - (a + bx_i)]^2 \quad (15)$$

式中:  $(x_i, y_i)$  为焊缝骨架图像中各像素点的坐标;

$n$  为像素点个数;  $a, b$  为待拟合直线参数。

### 4 结果分析

该试验使用无线遥控器控制爬壁机器人在罐体表面沿焊缝爬行, 采集若干组不同位置的焊缝图像, 并分别对其进行预处理以及焊缝提取。爬壁机器人爬行速度约  $2 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ , 图像采集帧率为 10 帧  $\cdot \text{s}^{-1}$ 。爬行过程中拍摄不同位置的图像。试验过程中采集到的部分图像如图 9 所示。

从中随机选取 6 组不同位置的焊缝图像, 不同焊缝路径的提取效果如图 10 所示。其中, 蓝色虚线为人工标注焊缝位置, 红色直线为算法提取出的焊缝位置,  $\theta_0$  表示人工标注的焊缝路径与垂直方向的夹角,  $\theta_1$  表示算法提取出的焊缝路径与垂直方向的夹角, 试验过程中选定逆时针为正方向。为进一步验证焊缝提取算法的有效性, 采用直线差异度<sup>[14]</sup>对算法处理结果进行评价。直线差异度定义为

$$\delta = \sqrt{(\Delta k)^2 + (\Delta b)^2} \quad (16)$$

式中:  $\delta$  为两直线的差异度;  $\Delta k$  为两直线之间的斜率差;  $\Delta b$  为两直线之间的截距差。直线差异度越小, 代表两直线相似度越好。

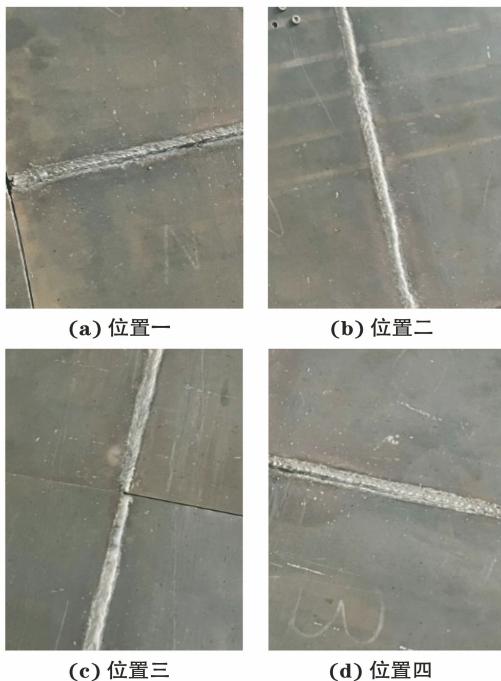


图 9 试验过程中采集到的部分图像

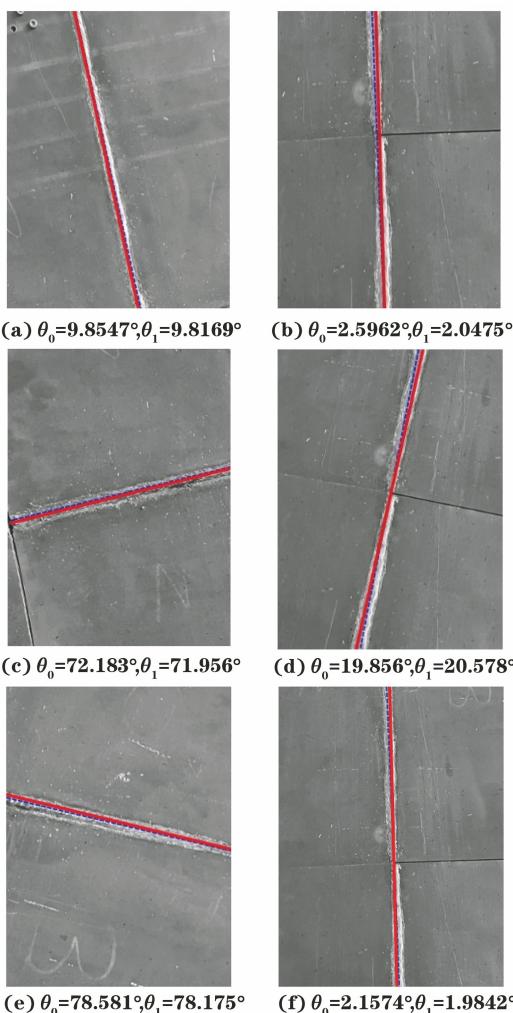


图 10 不同焊缝路径的提取效果

试验中, 共采集 6 240 幅原始焊缝图像, 采用直线差异度作为误差函数, 得到的算法提取直线与人工标注直线的误差分布曲线如图 11 所示。

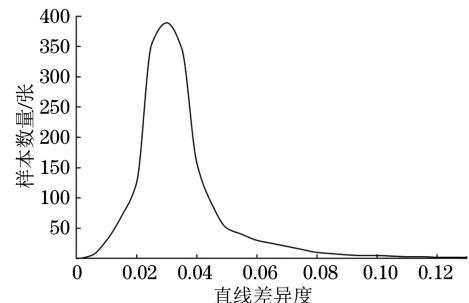


图 11 算法提取直线与人工标准直线的误差分布曲线

当直线差异度小于 0.05 时, 可认为焊缝路径提取准确。试验结果表明, 该算法焊缝路径提取准确率达到 90% 以上, 满足爬壁机器人对准确度的要求; 算法处理时间为 200 ms, 能较好地满足实时性要求。爬壁机器人基于该算法处理得到的焊缝偏差角度, 实时调整其相对位置, 始终保持运行方向与焊缝路径方向平行, 达到了辅助爬壁机器人精准定位焊缝的目的。

## 5 结语

基于被动式视觉传感器的焊缝提取算法易受自然光照条件等因素的影响, 为了解决此问题, 提出了一种基于本征图像分解的焊缝提取算法。通过对原始焊缝图像不同区域的梯度分布进行分析, 发现焊缝区域图像梯度特征较为明显, 且梯度呈长尾分布。因此, 基于梯度稀疏先验, 可将图像分解为仅含整体结构的前景图层, 以及仅含光照等平滑信息的背景图层。对前景图层中焊缝区域进行增强, 即可提取出焊缝路径, 有效减弱了光照条件对算法处理效果的影响。

试验结果表明, 所提出的算法对不同位置的焊缝提取效果较好, 能够实现爬壁机器人对焊缝的准确定位。此外, 该算法也存在一定不足, 例如对于一些梯度特征不明显的小焊缝, 其无法达到预期的处理效果。

## 参考文献:

- [1] 潘焕焕, 赵言正, 王炎. 锅炉水冷壁清扫、检测爬壁机器人的研制[J]. 中国机械工程, 2000, 11(4): 372-375.
- [2] 田兰图. 油罐检测爬壁机器人技术及系统研究[D]. 北京: 清华大学, 2004.
- [3] 李志海. 轮足混合驱动爬壁机器人及其关键技术的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.
- [4] XIAO Z W. Research on a trilines laser vision sensor

- for seam tracking in welding[C]//Lecture Notes in Electrical Engineering. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg,2011.
- [5] KIDDEE P, FANG Z J, TAN M. An automated weld seam tracking system for thick plate using cross mark structured light [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 87 (9): 3589-3603.
- [6] ZHANG K, CHEN Y X, GUI H, et al. Identification of the deviation of seam tracking and weld cross type for the derusting of ship hulls using a wall-climbing robot based on three-line laser structural light [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2018, 35: 295-306.
- [7] 莫玲,高向东,萧振林,等.微间隙焊缝磁光图像增强方法[J].焊接技术,2015,44(6):17-22.
- [8] 刘涛,左继业,张晓森,等.环形焊缝的双目视觉定位与跟踪研究[J].机械科学与技术,2021,40(6):928-933.
- [9] XU Y L, FANG G, CHEN S B, et al. Real-time image processing for vision-based weld seam tracking in robotic GMAW [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2014, 73 (9): 1413-1425.
- [10] DINHAM M, FANG G. Autonomous weld seam identification and localisation using eye-in-hand stereo vision for robotic arc welding [J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2013, 29 (5): 288-301.
- [11] 王文超,高向东,丁晓东,等.无坡口对接焊缝特征角点检测方法[J].焊接学报,2018,39(9):61-64,131.
- [12] ZHANG M L, DESROSIERS C. Image denoising based on sparse representation and gradient histogram [J]. IET Image Processing, 2017, 11(1): 54-63.
- [13] LI Y, BROWN M S. Single image layer separation using relative smoothness [C]//2014 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. OH, USA: IEEE, 2014.
- [14] BAI Z J, CASSANI D, DONATELLI M, et al. A fast alternating minimization algorithm for total variation deblurring without boundary artifacts[J]. Journal of Mathematical Analysis and Applications, 2014, 415 (1): 373-393.
- [15] 马宝琰,汤磊,赵晶,等.风电叶片图像直线特征检测与拼接方法[J].哈尔滨理工大学学报,2020,25(5): 83-92.

(上接第32页)

- [15] TU T M, HUANG P S, HUNG C L, et al. A fast intensity-hue-saturation fusion technique with spectral adjustment for IKONOS imagery [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2004, 1(4): 309-312.
- [16] YANG B, LI S T. Pixel-level image fusion with simultaneous orthogonal matching pursuit [J]. Information Fusion, 2012, 13(1): 10-19.
- [17] SUN K S, LIU F S. Research on the multi-focus image fusion method based on the second-generation Curvelet transformation[J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, 687: 3624-3627.
- [18] YIN H T, LI S T, FANG L Y. Simultaneous image fusion and super-resolution using sparse representation[J]. Information Fusion, 2013, 14 (3): 229-240.
- [19] 蔺素珍,韩泽.基于深度堆叠卷积神经网络的图像融合[J].计算机学报,2017,40(11):2506-2518.