

文章编号 1004-924X(2017)03-0765-07

微细对接焊缝初始点定位方法

孙农亮^{1*}, 崔红星^{1,2}, 梁少华²

(1. 山东科技大学 电子通信与物理学院, 山东 青岛 266590;
2. 吉林大学 烟台研究院, 山东 烟台 264003)

摘要:为了解决焊接机器人对薄板微细焊缝的自动定位和焊接问题,研究了一种基于视觉的高精度微细对接焊缝初始点定位方法。提出一种局部范围内两步精确定位方法,第一步,获取工件在不同尺度及旋转角度下的图像,建立典型的模板匹配库,利用模板匹配方法提取出焊缝初始点位置区域;第二步,采用 Shi-Tomasi 算法在此局部范围内进行角点检测,计算亚像素级角点位置并进行初始点精确定位。通过对现场拍摄的 50 幅不同高度和旋转角度的图像进行初始点检测,实现了对所有图像的准确检测。实验结果表明,两步定位方法鲁棒性强,可以精确定位出规则边界和不规则边界焊缝的初始点,解决了微细对接焊缝初始点定位问题,达到了期望结果。

关键词:焊缝初始点;归一化相关系数;模板库;亚像素;Shi-Tomasi 角点检测

中图分类号:TP391.41 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20172503.0765

Method for initial point positioning of micro butt welding seam

SUN Nong-liang^{1*}, CUI Hong-xing^{1,2}, LIANG Shao-hua²

(1. College of Electronic Communication and Physics,
Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China;
2. Yantai Research Institute of Jilin University, Yantai 264003, China)

* Corresponding author, E-mail: nl-jackson@vip.163.com

Abstract: A vision based method for initial point positioning of micro butt welding seam was studied in order to automatically position and weld the welding seam for the welding-robot. The method could be divided into two steps as follows. Firstly, the images of the workpiece at different scale and rotation angle were obtained and a typical template matching library was established, and then the initial point location area of the weld was extracted by using the template matching method. Secondly, the Shi-Tomasi algorithm was used to detect the corner points in the local area and to calculate the corner position at the sub pixel level. Fifty images at different heights and angles captured on the spot were used in the experiment, and all the initial points of the micro butt welding seams were detected correctly. Experimental results show that the two-step localization method has strong robustness, high positioning precision of a regular boundary or an irregular boundary. This method solved the problem of micro butt weld initial point positioning, resulting in a satisfactory result.

收稿日期:2016-12-16; **修订日期:**2017-01-02.

基金项目:国家 863 项目子课题:矿井灾害动态演化技术验证平台(No. 2015AA016404-4);山东科技大学领军人才计划项目

Key words: Initial point of welding seam; normalized correlation coefficient; template library; sub pixel; Shi-Tomasi corner detection

1 引言

薄板焊接技术在国防、航空、化工及电子等领域的应用越来越普遍,对于薄板焊接的自动化控制需求也越来越高。薄板焊接通常采用小坡口或无坡口的焊接形式,对于这种形式,采用常规的焊缝初始点检测方法很难得到理想效果。因此,研究一种针对微细对接焊缝初始点的快速定位方法对于薄板焊接系统具有重要意义。

目前,学者们对于焊缝初始点位置寻找、识别以及对机器人导引方面均有一定研究。陈海永等人研究了基于视觉的起始点识别与定位控制在薄钢板对接焊中的应用^[1],朱振友等人提出了一种两阶段模板匹配方法用于识别焊缝起始点。该方法首先利用全局匹配方法剔除了明显的错误数据点,然后利用局部动态搜索方法寻找焊缝的起始点^[2]。徐小明提出了局部环境焊缝初始位置的图像识别方法,通过由粗到细的 2 步模板匹配方法提取出焊缝初始位置,然后利用边缘线相交定位初始点^[3]。但是该文在进行模板匹配时未充分考虑工件的尺度变化和旋转变换,方法的鲁棒性不是很强。朱振友等人采用双目立体视觉技术通过焊接机器人对初始焊接位置进行识别,对中控制实现了焊缝起始点的定位。该方法对于宽度大于 20 mm 的焊缝起始点的位置识别可以满足使用要求,但是难以满足微细对接焊缝识别精度小于 0.1 mm 的要求^[4]。陈善本、陈希章、方灶军也对焊缝起始点涉及到的相关问题进行了研究^[5-6]。目前关于实时焊缝初始点识别与定位的研究虽然在一定程度上能够满足特定形状焊缝以及特定的应用需求,但较少考虑到窄焊缝识别精度、特征提取可靠性等方面的要求,因此探讨一种针对微细对接焊缝的快速、高精度和稳定的焊缝初始点定位方法具有重要的现实意义。

2 视觉传感系统的构建

视觉传感系统分为主动光视觉系统与被动光

视觉系统^[7-8]。主动光视觉系统一般由特定结构的光源与摄像机组成,其利用具有某种结构的光源将光线投射到工件表面上,由摄像机获取工件表面图像并进行处理。鉴于主动光视觉系统的精度较被动光视觉系统更高,受外界条件变化的影响较小,实际应用广泛,本文自主设计了基于主动光的视觉传感系统,如图 1 所示。微细对接焊缝视觉跟踪系统^[9-12]主要由 3 部分组成:视觉传感系统、机器人系统、主控计算机。其中视觉传感系统由一个数字摄像机和一个结构光光源组成,本实验选用的是加拿大的 Point Grey 摄像机,LED 光源的峰值波长为 660 nm,带宽为 20 nm,一字型激光发生器的中心波长为 660 nm,带宽为 10 nm。数字摄像机安装于焊枪前方 50 mm 处,为了使焊缝图像能较好地反映焊枪偏离焊缝的情况,令数字摄像机的光轴中心垂直于薄钢板平面。LED 光源位于摄像机两侧,倾斜一定角度打向工件,确保摄像机获取到清晰图像。激光发生器由定位支架固定于焊枪与数字摄像机前方,并倾斜一定的角度,确保其打出的激光带在摄像机的视野范围内。数字摄像机以 25 frame/s 的速率采集焊缝图像,并把它传输到工业计算机上,工业计算机完成图像处理^[13]、焊缝初始点定位以及对机器人状态的读取,并将纠偏信息传递给机器人控制器,机器人控制器通过执行机构调节焊枪位置,使其精确到达焊缝初始焊接点,进而实现了对微细对接焊缝初始点的定位。

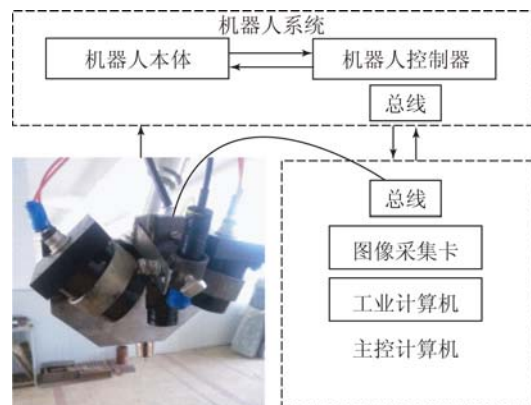


图 1 微细焊缝视觉跟踪系统

Fig. 1 Vision tracking system of micro butt welding seam

3 微细对接焊缝初始点定位

3.1 模板匹配提取焊缝初始位置区域

采用视觉传感方法对图像进行识别及理解过程中,匹配技术起着重要作用。匹配的主要工作就是将模板在待匹配图像上滑动,根据匹配模型计算它们之间的相似度,相似度最大处即为匹配最佳处。模板匹配多是在一幅大图像中寻找与模板具有相近尺寸、方向和图像的目标,再通过匹配算法确定其坐标位置。

3.1.1 模板匹配库构造规则

在进行模板匹配时,模板的选取决定着匹配精度和速度,选取合适的模板至关重要。由于在焊接过程中存在工件位置摆放不标准问题,文中

$$R(r, c) = \frac{\sum_{x=0}^{w-1} \sum_{y=0}^{h-1} [T(x, y) - \bar{T}(x, y)][I(x+r, y+c) - \bar{I}(x, y)]}{\sqrt{\sum_{x=0}^{w-1} \sum_{y=0}^{h-1} [T(x, y) - \bar{T}(x, y)]^2} \sqrt{\sum_{x=0}^{w-1} \sum_{y=0}^{h-1} [I(x+r, y+c) - \bar{I}(x, y)]^2}}, \quad (1)$$

式中: $R(r, c)$ 是在位置 (r, c) 处待匹配图像与模板图像的归一化相关系数, $I(x, y)$ 为 (x, y) 处的像素灰度值, $I(x+r, y+c)$ 为在 $(x+r, y+c)$ 处的像素灰度值, $\bar{T}(x, y)$ 是 $T(x, y)$ 内所有像素的平均值, $\bar{I}(x, y)$ 是 $I(x, y)$ 与 $T(x, y)$ 当前位置相对应区域的平均值。归一化相关系数匹配法是将模板对其均值的相对值与图像对其均值的相关值进行匹配,把相关系数 $R(r, c)$ 通过归一化方法经过尺度变换到区间 $[-1, 1]$ 中。相关系数越大表示待匹配图 (r, c) 位置与模板的匹配程度越高,当相关系数为 1 或接近 1 时表示 (r, c) 位置即为最佳匹配点,定位以该点为中心的 $w \times h$ 窗口区域作为焊缝初始点区域;当相关系数为 -1 或接近 -1 时表示 (r, c) 位置即为最糟糕的匹配点,确定该点为非焊缝初始点位置。模板匹配算法如下:

(1) 初始化模板匹配库里的模板, $A = \{A_i, i=1, 2, \dots, 6\}$ 。

(2) 使用 A_i 模板与待匹配图像进行匹配,记为 $R_i(r, c)$ 。

(3) 如果相关系数大于等于 0.96, 定位出以该点为中心的 $w \times h$ 窗口区域, 匹配结束, 否则转到步骤(4);

(4) 判断待匹配图像是否为 A_6 模板。若不是 A_6 模板, 则在模板匹配库里选择 A_{i+1} 模板与待匹

提出采用模板匹配库进行模板匹配, 以提高模板匹配算法对图像尺度变化和旋转角度变化的鲁棒性。在焊缝初始点处, 焊缝边缘与两工件边缘相交, 而这一特性在数字摄像机获取的图像中是独特的, 因此本文选取此区域图像作为匹配模板。为了提高效率, 库中模板数量应尽量少, 但又得涵盖实际工作中的不同情况, 故使摄像头在相对工件具有两种高度和 3 个角度下共拍摄 6 幅图像作为模板。

通过对多个模板匹配方法进行测试实验及比较, 兼顾速度和精度要求, 最终选择归一化相关系数匹配法作为本文的模板匹配方案。

3.1.2 模板匹配算法

假设待匹配图像 $I(x, y)$ 的尺寸为 $m \times n$, 模板图像 $T(x, y)$ 的尺寸为 $w \times h$, 其中: $w < m$, 且 $h < n$, 则它们之间的相关函数可以表示为:

配图像进行模板匹配, 然后转到步骤(3); 若为 A_6 模板, 则选出 $R_i(r, c)$ 中的最大值, 并定位出以该点为中心的 $w \times h$ 窗口区域, 匹配结束。

3.2 角点检测

可以通过在焊缝起始点区域内进行角点检测求取焊缝初始点, 角点检测^[14]精度在初始点定位中至关重要。传统角点检测算法可以归纳为两类: 一是根据图像边缘特征, 用轮廓点计算边缘曲率或夹角进行判定, 如图像边界上曲率变化明显的点^[15], 图像边界上曲率足够高的点等^[16]; 二是直接利用灰度进行角点检测, 如 Harris、Moravec、Susan 等算法。

3.2.1 Shi-Tomasi 角点检测

Shi-Tomasi 检测算法^[17]是在 Harris 角点检测算法^[18]的基础上进行改进的, 其工作原理是计算像素所在位置的梯度检测角点。如果像素所在位置的一阶导数为局部最大值, 并且在水平方向和竖直方向上均有变化, 即在 2 个方向的梯度局部最大, 则认为该像素位置为角点。设灰度图像 I 在点 (x, y) 处的灰度值为 $I(x, y)$, 以该点为中心建立一个 $w \times w$ 的窗口, 将窗口在图像 I 上移动, 计算出图像中的灰度变化 E 。局部图像的灰度变化程度用近似的互相关函数 $E(x, y)$ 表示, 公式如下:

$$E(\Delta x, \Delta y) = \sum_{(x,y) \in w} w(x,y) [I(x+\Delta x, y+\Delta y) - I(x,y)]^2, \quad (2)$$

式中: $I(x, y)$ 表示图像在 (x, y) 的灰度值, $I(x+\Delta x, y+\Delta y)$ 表示窗口移到 $(x+\Delta x, y+\Delta y)$ 位置时的灰度值。由于角点是灰度值变化最大的点,

$$E(\Delta x, \Delta y) = \Delta x^2 \sum_{(x,y) \in w} w(x,y) I_x^2 + 2\Delta x\Delta y \sum_{(x,y) \in w} w(x,y) I_x I_y + \Delta y^2 \sum_{(x,y) \in w} w(x,y) I_y^2, \quad (3)$$

其中: I_x 和 I_y 为灰度图像在 x 和 y 方向的偏导数, $w(x, y)$ 为高斯滤波器, 设一个 2×2 的矩阵 \mathbf{M} :

$$\mathbf{M} = \sum_{(x,y) \in w} w(x,y) \begin{bmatrix} I_x^2 & I_x I_y \\ I_y I_x & I_y^2 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

因此 $E(\Delta x, \Delta y)$ 可以表达为矩阵形式:

$$E(\Delta x, \Delta y) = [\Delta x, \Delta y] \mathbf{M} \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{bmatrix}, \quad (5)$$

设 λ_1, λ_2 为矩阵 \mathbf{M} 的两个特征值, 定义 R 为两个特征值中的最小值。

$$R = \min(\lambda_1, \lambda_2). \quad (6)$$

Shi-Tomasi 算法将 R 值与预先设置的阈值进行比较, 若 R 大于最小阈值, 即 $\lambda_2 \geq \lambda_1$ 且 $\lambda_1 \geq k\lambda_{\max}$, 其中 k 为比例系数, λ_{\max} 为图像中任意像素点较小特征值中的最大值, 则判定此像素点为强角点。Harris 算法是将矩阵 \mathbf{M} 的行列式值与 \mathbf{M} 的迹相减, 再将差值同预先给定的阈值进行比较。Harris 算法将角点相应函数 R 定义如下:

$$R = \lambda_1 \lambda_2 - k(\lambda_1 + \lambda_2)^2. \quad (7)$$

如果 R 值大于预先设置的阈值时, 则判定该点为角点。在很多情况下, Shi-Tomasi 算法的检测效果要优于 Harris 算法。本文采用的 Shi-Tomasi 算法工作过程如下:

(1) 利用高斯函数分别在水平和垂直方向上求得一阶高斯偏导数 I_x, I_y 。

(2) 根据 I_x, I_y 求得 $I_x^2, I_x I_y, I_y I_x, I_y^2$ 4 个元素值组成 2×2 的矩阵。

(3) 利用高斯平滑函数对式(2)中求得的矩阵做平滑滤波, 得到 \mathbf{M} 矩阵。

(4) 求得 \mathbf{M} 矩阵的特征值 λ_1 和 λ_2 , λ_1 和 λ_2 中的最小值与初始最小阈值进行比较, 判定此像素点是否为强角点。

(5) 设定阈值 T_1 和 T_2 , 对检测到的角点数目和角点之间的最小距离进行约束, 剔除检测出的伪角点。

因此需要求得 $E(\Delta x, \Delta y)$ 的最大值, 对其进行泰勒展开:

3.2.2 亚像素级角点提取

为了得到更精确的角点位置, 在使用 Shi-Tomasi 角点检测方法得到角点位置后, 需要计算亚像素级^[19]的角点位置。设初始角点 q 在实际亚像素级角点附近, 检测所有 $q-p$ 向量。情况一: 若点 p 位于一个均匀区域内, 则 p 处的梯度为 0; 情况二: 若 $q-p$ 向量的方向与边缘方向一致时, 则此边缘上 p 点处的梯度与 $q-p$ 向量正交。在上述两种情况下 p 处的梯度与向量 $q-p$ 的点积为 0。在 p 周围可以得到很多组梯度以及相关的向量 $q-p$, 令它们的点积为 0, 方程组的解即为角点 q 的位置, 其为亚像素级精度, 也就是精确的角点位置, 其求解示意图如图 2 所示。

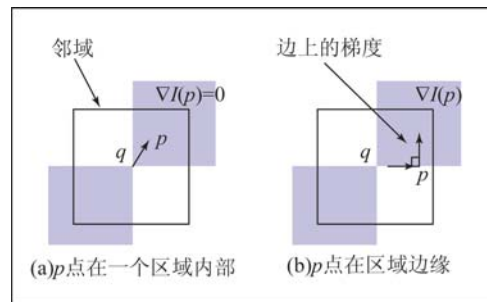


图 2 计算亚像素级精度的角点

Fig. 2 Corner calculation of sub pixel level accuracy

3.2.3 焊缝初始点定位准则

通过大量试验发现, 焊缝的 3 个角点中有两个正确角点位置在 x 方向的像素误差小于 5 pixel 且大于 1 pixel, 在 y 方向的像素误差小于 8 pixel 且大于 4 pixel。根据这一规律, 选择 3 个角点中像素位置最近的两个角点作为正确角点, 取这两个正确角点的中点坐标作为焊缝初始点位置。若在工件环境很复杂且边界不均匀的情况下, 没有角点满足这一规则, 此时以每个角点^[20]为中心, 统计以 5 pixel 为半径范围内的角点个数, 找出该范围内含有的角点个数最多的角点坐标。如果该角点坐标与上一个焊缝初始点坐标误差小于 5 pixel,

即认定此中心角点为正确角点,否则考虑该范围内含有角点个数第二多的角点坐标,正确角点坐标即为焊缝初始点位置。

4 实验结果与分析

具体实验过程中,涉及到摄像机的标定,图像的几何形变校正等工作,在此不再赘述。

实验所用薄铝合金板工件尺寸为 600 mm×400 mm×3 mm,焊缝间隙小于 0.1 mm。

摄像机距工件两种不同高度下进行拍摄,摄像机在工件上方 120 mm 处,分别在 0°、10°、20°方向上拍摄 3 幅图像;同理,在工件上方 150 mm 处拍摄 3 幅图像,构成模板库;此时焊缝宽度 s 分别为 0.05 和 0.08 mm。其中的 3 幅图像如图 3 所示。

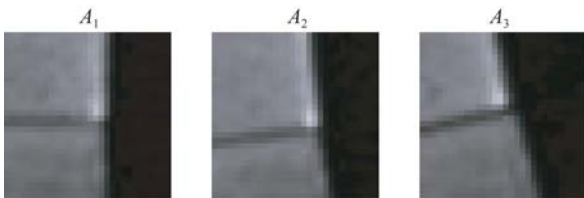
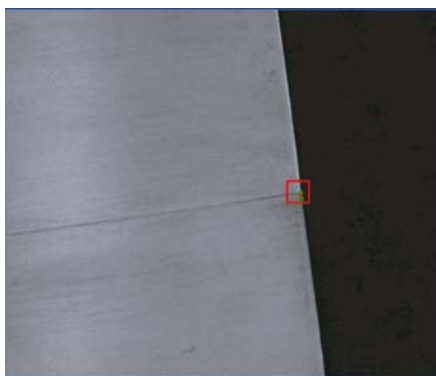
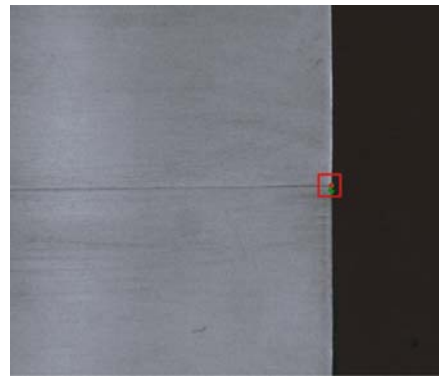


图 3 匹配模板库
Fig. 3 Matching templates

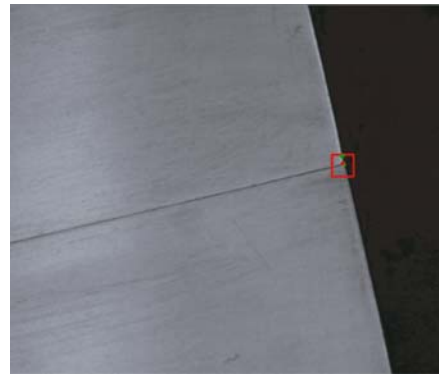
在进行亚像素级角点检测时,设阈值 $T_1 = 3$, $T_2 = 0$,其中绿色实心原点表示检测出的正确角点,红色实心原点表示检测出的焊缝初始点,亚像素级角点检测效果如图 4 所示(彩图见期刊电子版),模板匹配和角点检测数据如表 1 和表 2 所示。



$h = 150 \text{ mm}, s = 0.07 \text{ mm}, d = 10^\circ$



$h = 150 \text{ mm}, s = 0.1 \text{ mm}, d = 0^\circ$



$h = 150 \text{ mm}, s = 0.08 \text{ mm}, d = 20^\circ$

图 4 焊缝初始点定位效果图

Fig. 4 Initial point position results of welding seam

从图 4 可看出,文中的模板匹配算法克服了焊缝图像尺度变化及旋转角度变化的问题,该算法具有很好的鲁棒性。表 1 中的最优相关系数均大于 0.96,表明该模板匹配算法具有很高的准确性。通过表 1 的初始区域顶点坐标可以看出,本文模板匹配算法可以成功完成匹配,精确定位出焊缝初始点位置区域。

表 1 焊缝初始点位置区域信息

Tab.1 Regional information of initial point of welding seam

匹配中心坐标	最优模板	最优 R 值	初始区域顶点坐标
(390,237)	A_2	0.985 7	(390,237), (450,297)
(424,232)	A_1	0.982 7	(424,232), (484,292)
(445,206)	A_3	0.989 2	(445,206), (505,266)

通过图 4 可看出,焊缝初始点被准确定位,表 2 是亚像素级角点检测算法得到的焊缝初始点信息,综合图 4 的角点检测效果图和表 2 的数据可

知, Shi-Tomasi 算法可以准确检测出焊缝的角点, 亚像素级角点检测可以精确定位出焊缝的初始点, 并且算法的鲁棒性极强, 具有很高的应用价值。

表 2 焊缝初始点信息

Tab. 2 Initial point information of welding seam

角点 1 坐标	角点 2 坐标	初始点坐标
(410. 2, 261. 6)	(410. 2, 261. 6)	(410. 2, 261. 6)
(440. 0, 253. 0)	(441. 7, 247. 0)	(440. 9, 250. 0)
(460. 6, 218. 5)	(460. 6, 218. 5)	(460. 6, 218. 5)

已知焊缝原图的分辨率为 $600 \text{ pixel} \times 510 \text{ pixel}$, 对应长边的物理尺寸是 40.2 mm , 这样计算出算法精度为 $40.2/600=0.067 \text{ mm/pixel}$, 即能够实现 $0.07, 0.08, 0.1 \text{ mm}$ 焊缝的初始点检测, 且能够满足精度要求。

接下来对 50 幅不同高度和旋转角度拍摄的图像进行初始点检测, 该方法完成了对所有图像的准确检测。

参考文献:

- [1] 陈海永, 方灶军, 徐德, 等. 基于视觉的薄钢板焊接机器人初始点识别与定位控制[J]. 机器人, 2013, 35(1): 90-97.
CHEN H Y, FANG Z J, XU D, *et al.*. Vision based starting position recognition and positioning control for thin steel sheet welding robot [J]. *ROBOT*, 2013, 35(1): 90-97. (in Chinese)
- [2] ZHU Z Y, LIN T, PIAO Y J, *et al.*. Recognition of the initial position of weld based on the image pattern match technology for welding robot [J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2005, 26(7): 784-788.
- [3] 徐小明, 张华. 局部环境焊缝初始位置图像识别方法[J]. 焊接技术, 2011, 40(11): 10-13.
XU X M, ZHANG H. Image recognition of the weld initial position in the local environment [J]. *Welding Technology*, 2011, 40(11): 10-13. (in Chinese)
- [4] 朱振友. 焊接机器人初始焊位视觉识别与导引研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2004.
ZHU ZH Y. *Study on vision recognition of original welding position and tracking of welding robot* [D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University,

5 结 论

本文采用模板匹配和角点定位方法成功实现了对微细对接焊缝的初始点定位, 简单快速并且具有较高的定位精度和准确度。采用基于典型模板库的匹配方法, 通过比较相关性系数与阈值来确定目标是否出现, 不仅克服了尺度变化和旋转角度变化的问题, 而且能够准确获取焊缝初始点的初始区域。在获取的焊缝起始点的初始区域内, 基于 Shi-Tomasi 算法进行角点检测, 并通过求解方程组获取亚像素级精度的角点, 进而实现焊缝初始点的精确定位。实验结果表明, 文中提出的方法能够以高精度实现焊缝初始点的智能定位, 对现场采集的 50 幅图像进行检测, 取得了令人满意的效果。下一步计划把本文自主设计的视觉传感系统应用在微细对接焊缝跟踪上, 结合本文所用算法研究一种新的焊缝跟踪方法, 以解决微细对接焊缝跟踪难的问题。

2004. (in Chinese)

- [5] 陈希章, 陈善本. 弧焊机器人起始焊接位置图像识别与定位[J]. 焊接学报, 2009, 30(4): 17-22.
CHEN X ZH, CHEN SH B. Recognition and positioning of start welding position for arc welding robot [J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2009, 30(4): 17-22. (in Chinese)
- [6] 方灶军, 鄢治国, 徐德. 集装箱薄板的对接焊缝视觉跟踪系统[J]. 上海交通大学学报, 2008, 42(增): 80-83.
FANG Z J, YAN ZH G, XU D. Visual tracking system for narrow butt seams on thin plate of container [J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 2008, 42(Supp.): 80-83. (in Chinese)
- [7] MA H B, WEI SH CH, SHEN ZH X. Robot welding seam tracking method based on passive vision for thin plate closed-gap butt welding [J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2010, 48(9): 945-953.
- [8] SHEN H Y, WU J, LIN T. Arc welding robot system with seam tracking and weld pool control based on passive vision [J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2008, 39(7-8): 669-678.

- [9] WEI SH CH, MA H B, LIN T. Autonomous guidance of initial welding position with single camera and double positions method [J]. *Sensor Review*, 2010,30(1):62-68.
- [10] ZHEN Y, GU F, CHEN SH B, *et al.*. A robust algorithm for weld seam extraction based on prior knowledge of weld seam [J]. *Sensor Review*, 2013, 33(2): 125-133.
- [11] SHEN H Y, LIN T, CHEN SH B. Real-time seam tracking technology of welding [J]. *Robot With Visual Sensing Journal of Intelligent and Robotic Systems*, 2010,59(3): 283-298.
- [12] MA H B, WEI SH CH, LIN T. Binocular vision system for both weld pool and root gap in robot welding process[J]. *Sensor Review*, 2010,30(2): 116-123.
- [13] SHI F H, LIN T, CHEN SH B. Efficient weld seam detection for robotic welding based on local image processing [J]. *Industrial Robot*, 2009, 36(3):277-283.
- [14] 高向东,黄健源,莫玲. 激光焊接不锈钢微间隙焊缝偏差角点检测法[J]. *焊接学报*, 2013,34(12): 1-4.
GAO X D, HUANG J Y, MO L. Detection of seam deviation of micro butt gap in laser welding of 304 austenitic stainless steel based on corner point method [J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2013,34(12):1-4. (in Chinese)
- [15] 吴坤,王小华. Shi-Tomasi 角点区域的拷贝图像检测[J]. *中国计量学院学报*, 2014,25(3):263-267.
WU K, WANG X H. An image copy detection algorithm based on Shi-Tomasi corner area [J]. *Journal of China University of Metrology*, 2014, 25(3): 263-267. (in Chinese)
- [16] 石永华,王晓佳,李学瑞. 用于波纹板角焊缝跟踪的变步长角点检测算法[J]. *华南理工大学学报*, 2014,42(3):78-83.
SHI Y H, WANG X J, LI X R. Variable-step corner detection algorithm for fillet weld tracking of corrugated plate [J]. *Journal of South China University of Technology*, 2014,42(3):78-83. (in Chinese)
- [17] SHI J, TOMASIC. Good feature to track [C]. *IEEE Press, Proc Of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 1994:593-600. (in Chinese)
- [18] HARRIS C, STEPHEN M. A combined corner and edge detector [C]. *Proceedings of the Fourth Alvery Vision Conference. Manchester: The University of Sheffield Printing Unit*, 1988: 207-212.
- [19] 朱遵尚,刘肖琳. 基于 GPU 的实时亚像素 Harris 角点检测[J]. *计算机工程*, 2010,36(12):213-215.
ZHU Z SH, LIU X L. Real-time sub-pixel Harris corner detection based on graphics processing unit [J]. *Computer Engineering*, 2010, 36(12): 213-215. (in Chinese)
- [20] 张辰,赵红颖,钱旭. 面向无人机影像的目标特征跟踪方法研究 [J]. *红外技术*, 2015, 37(2): 224-228.
ZHANG CH, ZHAO H Y, QIAN X. Research on object feature tracking method oriented to UAV images [J]. *Infrared Technology*, 2015, 37(2): 224-228. (in Chinese)

导师简介:



孙农亮(1962—),男,山东蓬莱人,博士,教授,博士生导师,主要从事图像处理、模式识别、机器视觉、虚拟现实等方面的研究。E-mail:nl-jackson@vip.163.com

作者简介:



崔红星(1989—),男,山东菏泽人,博士研究生,2016年于山东科技大学获得工学硕士学位,主要从事图像处理,机器视觉等方面的研究。E-mail:1042538365@qq.com