

激光焊接头焊缝自动检测及跟踪研究

马国栋¹, 王延深^{1*}, 史小田², 范光华³, 刘会英¹

¹ 哈尔滨工业大学(威海)机械工程系, 山东 威海 264209;

² 哈尔滨工业大学航天学院, 黑龙江 哈尔滨 150001;

³ 哈尔滨工业大学(威海)光电科学系, 山东 威海 264209

摘要 将激光焊接头与 CCD 视频跟踪模块集成在一起, 提出一种采用一字线激光进行自动化焊缝检测的方法。该方法利用激光三角测量法, 得到焊缝的高度、宽度等形状信息。在图像处理方面, 对所获得的焊缝区域图像进行中值滤波和二值化处理, 获得焊缝特征点二维坐标, 实现目标定位, 并计算其在世界坐标系下的三维坐标。在跟踪算法方面, 采用精度高、速度快的核相关滤波器目标跟踪算法, 分别对常见的直线型和曲线型焊缝位置进行跟踪。实验所得数据拟合曲线与焊缝形态误差在 5% 以内, 吻合度较高, 实时跟踪效果良好。

关键词 机器视觉; 激光焊接头; 焊缝检测; 激光三角测量法; 图像处理; 核相关滤波器跟踪算法

中图分类号 O435

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.111508

Weld Inspection and Tracking of Laser Welding Head

Ma Guodong¹, Wang Yanshen^{1*}, Shi Xiaotian², Fan Guanghua³, Liu Huiying¹

¹ Department of Mechanical Engineering, Harbin Institute of Technology at Weihai, Weihai, Shandong 264209, China;

² School of Astronautics, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China;

³ Department of Optoelectronics, Harbin Institute of Technology at Weihai, Weihai, Shandong 264209, China

Abstract The laser welding head is integrated with the CCD video tracking module, and a method for automatic seam detection based on a word line laser is proposed. This method uses laser triangulation to obtain the height, width, and other shape information of the weld. In the aspect of image processing, we perform median filtering and binarization on the obtained weld area image to obtain the two-dimensional coordinates of the weld feature points, achieve target position and calculate its three-dimensional coordinates in the world coordinate system. In the tracking algorithm, we use high accuracy and high speed kernel correlation filters target tracking algorithm to track the positions of common straight and curved welds. The verification experimental results show that the fitting curve and weld shape error are within 5%, the degree of coincidence is high, and the real-time tracking effect is good.

Key words machine vision; laser welding head; weld inspection; laser triangulation; image processing; kernel correlation filters tracking algorithm

OCIS codes 150.0155; 040.1490; 040.7290; 080.2740

1 引言

机器人激光焊接已广泛应用于各种焊接件和焊接场合, 离线编程是此类焊接常用的工作模式。由于焊接件的热变形等原因, 焊炬通常会偏离示教路径或理论焊缝; 因此, 需要通过焊缝跟踪技术对焊炬轨迹进行实时修正, 以提高焊缝的焊接质量。目前, 焊缝跟踪技术一般基于电弧传感、电磁信号传感、机械传感或

光信号传感等原理^[1-5], 随着计算机视觉技术的发展, 主动激光照明焊缝视觉传感技术日益受到关注^[6-10], 这推动了焊缝的智能识别和焊接过程的自动化。

激光焊接热变形小, 焊接效率高, 相比传统焊接方式具有显著优势。将激光焊接头的光学组件与视觉跟踪组件相互集成有利于增强视觉信息融合, 可简化焊接系统。如通快和 II-VI 等国外公司已推出相关产品, 而国内在该领域的研究和产品较少。在

收稿日期: 2018-04-24; 修回日期: 2018-05-25; 录用日期: 2018-06-08

* E-mail: wangyanshen@hit.edu.cn

焊缝图像处理和跟踪方面,一般采用线结构光或者环形激光等主动激光指示照明,在焊缝处形成断点或者V字形折线等形状^[11-13]。在CCD与指示激光不同轴的情况下,CCD可以对这些特征成像。利用激光三角测距法可以得到焊缝的形状信息,如宽度和深度值,以及走向等^[14-16]。在焊接情况下,存在强烈的等离子体发光和散射的工作激光,以及飞溅的金属液滴。尽管可以通过滤光措施减少非照明光的影响,但还是会影响焊缝成像。因此,需要对图像进行信号处理,以获取焊缝的特征信息。这些焊缝图像处理工作要求兼顾可靠性和运算速度,以满足对焊缝进行实时跟踪的要求^[17-20]。本文将激光焊接头

光路与CCD视频监控光路相集成,利用激光三角测距法建立算法模型。在核相关滤波器(KCF)目标跟踪算法基础上,采用基于灰度特征的图像处理方法,对直线焊缝和曲线焊缝进行识别,以获得焊缝中心点位置坐标,并拟合成焊缝曲线,从而提高激光焊接时的焊接质量。

2 光学设计与焊缝检测原理

2.1 整体光路方案

本文设计的激光焊接头的光学部分包括准直透镜组、聚焦透镜组,以及用于焊缝跟踪的CCD图像与视频监测模块,其组成结构如图1所示。

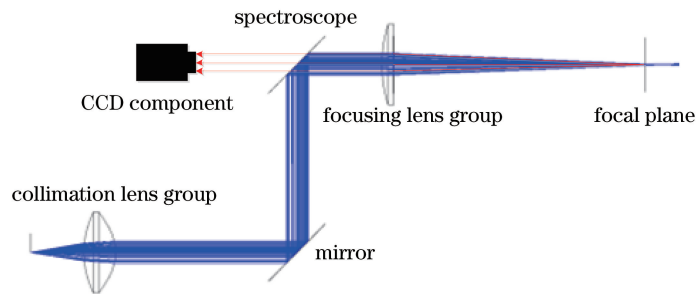


图1 焊接头光路与CCD模块光路集成示意图

Fig. 1 Sketch map of laser welding head and CCD system

在图1中,准直透镜组首先将光纤激光器发射的发散光准直,经反射后再到达聚焦模块,将准直光聚焦至一定大小,以满足激光焊接要求。为将CCD监测模块与焊接光路相集成,光路中设置两个对工作激光(波长为1070 nm)全反射的反射镜,CCD监测模块与焊接光路共用其中一个分光镜和聚焦透镜组。CCD中的透镜和激光焊接光路的聚焦透镜组构成一个望远镜系统,其物平面与聚焦透镜组的焦平面重合。分光镜对1050~1200 nm之外的近红外光和可见光(包括波长为650 nm的结构指示光)具有较高的透过率,因此从焊接件表面反射的结构指示光和等离子体所致光线都可以通过聚焦透镜和分光镜进入CCD,以观察焊接情况。

2.2 焊缝检测原理

图2为CCD图像检测原理图。图中一字线激光器发出的一字激光照射在工作激光焦点前方的焊件上,经表面漫反射后,通过聚焦透镜组和分光镜,最终在CCD上成像。焊接前,通过调整机器人使聚焦透镜的焦平面处在焊件上,通过调整CCD变焦镜头,使待焊接件在CCD上清晰成像。当焊接时,CCD视场中出现工作激光焦点的亮斑和一字激光,如图2中图样II所示,记录一字激光与工作激光焦

点之间的距离,为控制激光焊接头运动提供参考。如果焊接平面处在焦点上下很小范围内,则一字激光仍然可以进入CCD视场中成像。如图2中图样I和III所示。据此,对CCD成像的图样进行处理后反馈给控制系统,机器人带动激光焊接头移动相应距离,使聚焦透镜的焦平面靠近焊接平面,实现高度方向的焊缝跟踪。

采用激光三角测量法检测焊缝高度、焊缝宽度等参数。图3为激光三角法测量焊缝的原理图。图中 l_1 和 l_2 分别为镜头中心到底面的距离和像平面到镜头中心的距离。 N_1 和 N_2 分别为工件母材和待焊的上表面, n_1 和 n_2 为 N_2 到底面的距离与 N_1 到底面的距离。 N_1 和 N_2 两平面距离即焊缝高度记为 m ,则:

$$m = n_2 - n_1. \quad (1)$$

点B在像平面上对应点 B_1 ,点D在像平面上对应点 D_1 ,令 $h_1 = \overline{A_1D_1}$, $h_2 = \overline{B_1D_1}$ 。由图3可得:

$$\frac{h_1}{l_1} = \frac{w_1}{l_2 - n_1}, \quad (2)$$

$$w_1 = n_1 \cot \theta. \quad (3)$$

将(3)式代入(2)式,得:

$$n_1 = \frac{h_1 L_2}{L_1 \cot \theta + h_1}. \quad (4)$$

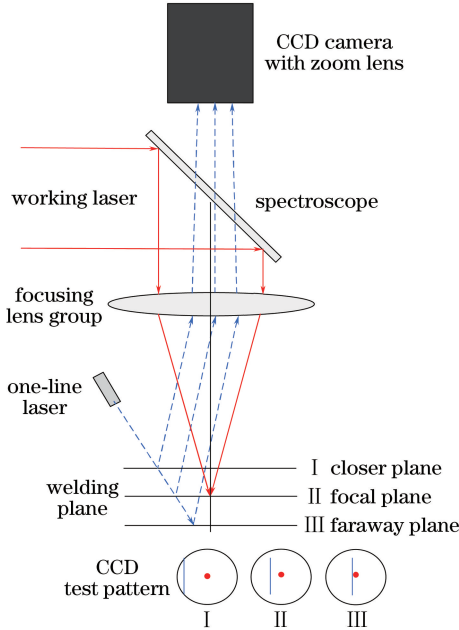


图 2 CCD 图像检测原理图

Fig. 2 Sketch map for CCD image detection

同样方法可得：

$$n_2 = \frac{(h_1 + h_2) l_2}{l_1 \cot \theta + h_1 + h_2} \quad (5)$$

将(4)式和(5)式代入(1)式,可得焊缝高度：

$$m = \frac{l_1 l_2 h_2 \cot \theta}{(l_1 \cot \theta + h_1 + h_2) (l_1 \cot \theta + h_1)} \quad (6)$$

同理,假设宽度为 s_1 的焊缝在像平面上的成像宽度为 s_2 ,则它们之间的关系为

$$s_1 = \frac{l_2 - n_1}{l_1} s_2 \quad (7)$$

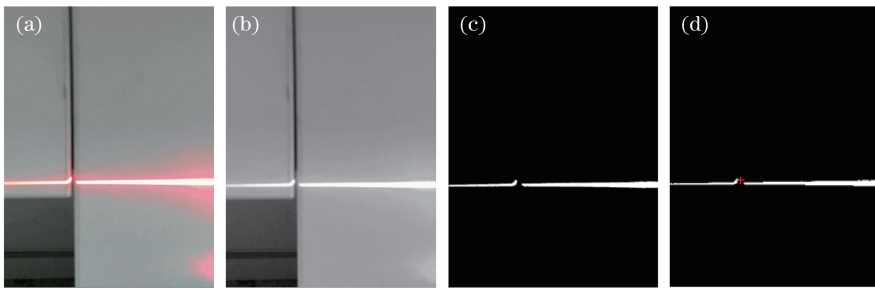


图 4 图像处理过程效果。(a)原图;(b)中值滤波;(c)二值化处理;(d)目标定位

Fig. 4 Image processing process renderings. (a) Original image; (b) median filter; (c) binary image; (d) target setting

设图 4(d)左侧亮线段为 A ,右侧亮线段为 B ,线条图像的最右端为 A_{MAX} 、 B_{MAX} ,最左端为 A_{MIN} 、 B_{MIN} ,用 (x, y) 代表测量线段上任一点的坐标,利用形心定位可求得线条状目标的横坐标 X 和纵坐标 Y 。

$$X = \frac{x A_{MAX} + x B_{MIN}}{2} \quad (8)$$

利用已知量 n_1 、 l_1 、 l_2 、 θ 和 s_2 ,以及 CCD 图像处理所获得的 h_1 和 h_2 值,可以得到焊缝高度值和宽度值。

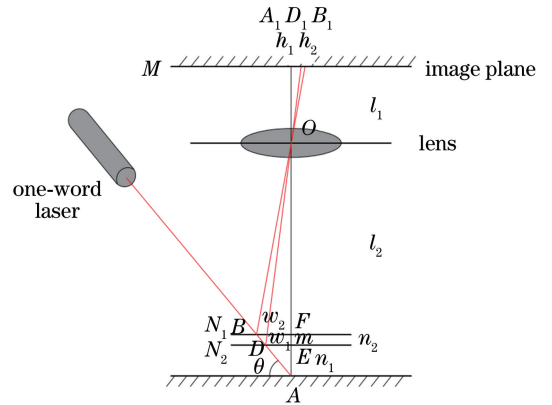


图 3 激光三角测量焊缝原理图

Fig. 3 Sketch map of laser triangulation principle

3 基于一字激光的焊缝视觉检测

3.1 焊缝图像的目标识别

利用图像采集卡采集 CCD 的焊件图像和视频,利用 Matlab 对其进行处理和分析,如图 4 所示。图 4(a)和图 4(b)分别为采集的原图和中值滤波之后的图片。由图 4(b)可知,原图中散射光造成的噪声被滤除,而边缘细节则得到了较好的保留。图 4(c)为二值化处理之后的图像,目标与背景的区别更加明显。图 4(d)为目标定位图,其中断点处的“十”字标注了目标所在位置。

$$Y = \frac{y A_{MAX} + y B_{MIN}}{2} \quad (9)$$

所采集图像的分辨率为 $480 \text{ pixel} \times 640 \text{ pixel}$,以左上角为图像原点,向右为横轴正方向,向下为纵轴正方向,计算得出目标的具体像素坐标为 $(162, 460)$ 。经过图像处理,得到上位机图像平面内的焊缝特征点。接下来,通过建立视觉检测系统数学模

型,获取焊缝在机器人基坐标系下的三维信息,并对其位置及形状进行测量,以实现焊缝检测跟踪。

3.2 视觉检测系统建模

图5为一字激光检测原理的示意图,由一字激光器、待焊工件和 CCD 像平面组成。激光焊接时,一字激光垂直打在焊缝上,经待焊工件上表面的漫反射,成像在 CCD 像平面上。像平面上的每一焊缝特征点将唯一确定待焊工件表面上的一点。

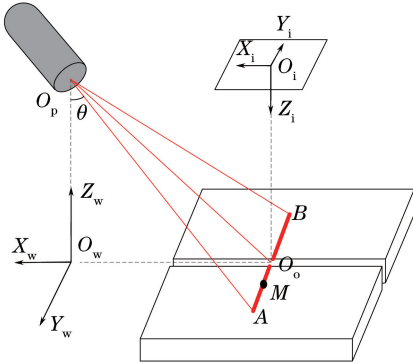


图5 一字激光检测原理示意图

Fig. 5 Schematic diagram of laser detection model

设世界坐标系(即机器人基坐标系)为 $O_w - X_w Y_w Z_w$, 摄像机坐标系为 $o - xyz$, 图像坐标系为 $O_i - X_i Y_i Z_i$, 像平面坐标系为 $O_i - X_i Y_i$ 。当一字激光在点 $O_p(0, 0, H_{w,p})$ 处以 θ 角度入射时,在焊接平面上投影出直线 AB 。 AB 与 X_w 轴相交于点 O_o , 则由标定得出线激光平面方程:

$$Z_w = H_{w,p} - X_w \cot \theta. \quad (10)$$

设直线 AB 上任意一点 M 在世界坐标系的坐标为 $(X_{w,M}, Y_{w,M}, Z_{w,M})$, 工件表面反射回来的一字激光在 CCD 像平面上成像点的坐标为 (X_M, Y_M, Z_M) 。当焊缝位于 xoy 平面时, Z_M 值不变, 其对应的齐次坐标分别为 $V_o = (X_o, Y_o, Z_o, k)$ 和 $V_i = (X_i, Y_i, Z_i, 1)$ 。

建立世界坐标系与图像坐标系之间的关系。首先,将世界坐标系平移至图像坐标系的像平面中心,使二者原点重合,此时 X_w 轴与 X_i 轴重合,该过程用平移矩阵 T_M 描述。然后,绕 X_w 轴旋转 180° , Z_w 轴与 Z_i 轴重合,该过程用旋转矩阵 R_x 描述。最后,对 M 点进行投射变换,得到齐次像坐标 $V_i = (X_i, Y_i, Z_i, 1)$, 该过程用变换矩阵 P_M 描述。

$$T_M = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & q_x \\ 0 & 1 & 0 & q_y \\ 0 & 0 & 1 & q_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (11)$$

$$R_x(\theta) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ 0 & \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (12)$$

$$P_M(f) = \begin{bmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & f & 0 \\ 0 & 0 & 1 & f \end{bmatrix}. \quad (13)$$

从世界坐标系变换到像平面坐标系的变换矩阵为

$$H = P_M(f) R_x(180^\circ) T_M, \quad (14)$$

式中 f 为 CCD 相机镜头的焦距。

通过处理图像提取焊缝特征,直接得到的是像平面坐标系下的参数信息,而焊缝跟踪控制所需的是世界坐标系下的参数信息。因此,建立世界坐标系与像平面坐标系下的齐次方程间的关系:

$$V_i = H V_o, \quad (15)$$

将(10)式、(14)式和(15)式联立,求解可得:

$$\begin{cases} X_w = \frac{X_i(H_{w,p} - H_{w,i} - f) - fH_{p,i}}{X_i \cot \theta - f} \\ Y_w = \frac{f - H_{w,p} + H_{w,i} + H_{p,i} \cot \theta}{X_i \cot \theta - f} Y_i \\ Z_w = -\cot \theta + H_{w,p} \end{cases}. \quad (16)$$

利用(16)式可以从像平面上某一点的坐标 (X_i, Y_i) 求取在世界坐标系下的对应点坐标 (X_M, Y_M, Z_M) , 这样便可实现对焊缝的图像识别。在对焊缝进行识别的基础上,利用 KCF 算法对焊缝进行跟踪。

4 基于 KCF 算法的焊缝跟踪

4.1 KCF 算法跟踪方案

目前,常见的目标跟踪算法有 KCF、核检测跟踪算法(CSK)、Struck 跟踪算法、输出的平方误差最小滤波器(MOSSE)等,其中, KCF 跟踪算法由于具有训练样本丰富、正确率高、速度快等优点,应用比较广泛。KCF 跟踪算法是一种基于检测的密集采样的跟踪算法,对于焊缝这样的背景干扰小、遮挡较少、移动速度较慢的目标来说,该算法能够实现对目标的准确快速跟踪。相比于其他目标跟踪算法,该算法在跟踪性能和跟踪速度上有所提升^[17-20]。

图6为 KCF 跟踪算法工作流程图。在工作时,首先,将工作目录下的视频按帧转存为图片,对第一帧图像进行去噪和数学形态学处理等预处理操作。

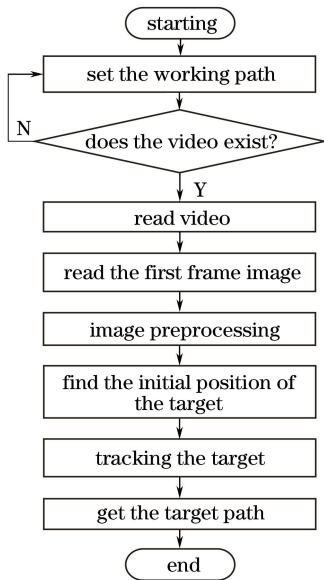


图 6 KCF 跟踪算法工作流程图

Fig. 6 Work flow chart of KCF tracking algorithm

其中,在识别第一帧时,若图像存在模糊等缺陷,则取前几帧图像中较为清晰的图像,后续目标跟踪也从选取的这一帧图像开始进行,再根据目标的灰度特征计算出目标的初始坐标。然后,利用 KCF 算法对后续图像中的目标进行跟踪,最终得到每帧图像中目标的坐标数据,即目标的移动路径。

4.2 焊缝跟踪实验

图 7 为一字激光引导直线焊缝跟踪过程图,其中,图 7(a)~(d) 分别为焊缝跟踪时的初始位置、1/3 处、2/3 处和结束位置,图中虚线方框为目标实时跟踪位置。在跟踪时,首先,采用 CCD 相机组件获取含一字激光和焊缝目标的图像,选取合适的第一帧图像对目标进行初始定位,定位结果如图 7(a) 所示。然后,进入 KCF 目标跟踪阶段,获取像平面坐标信息,在该阶段忽略畸变并换算为世界坐标。

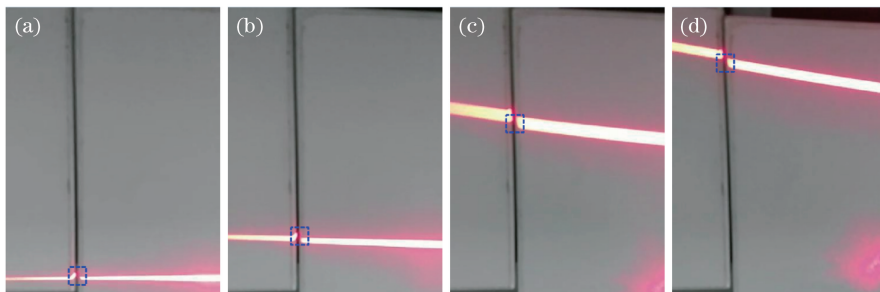


图 7 一字激光引导直线焊缝跟踪过程。(a)初始位置;(b)1/3 处;(c)1/2 处;(d)结束位置

Fig. 7 Laser-guided straight seam weld tracking process. (a) Start point; (b) 1/3 point; (c) 1/2 point; (d) end point

取 20 组实验数据进行曲线拟合,得到视觉检测的真实路径,如图 8 所示。

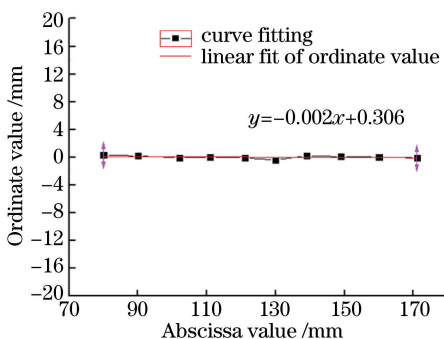


图 8 直线焊缝目标拟合曲线

Fig. 8 Target fitting curve of straight welds

在直线焊缝跟踪过程中,目标始终在虚线方框以内,自始至终从未丢失,证明该算法跟踪效果良好。图 8 中拟合方程为 $y = -0.002x + 0.306$, 曲线近似为直线,与实际焊缝形状基本吻合,证明该算法准确率较高,符合直线焊缝跟踪的要求。

同理,利用该方法对曲线焊缝进行跟踪,图 9 为一字激光引导曲线焊缝跟踪的过程图,原焊缝曲线函数为 $y = 0.2x^2$,跟踪过程与直线焊缝时相似。

从图 9 可以看出,在曲线焊缝跟踪过程中,目标也始终在虚线方框以内,证明该算法同样适用于曲线焊缝跟踪中,效果良好。取 18 组实验数据进行曲线拟合得到视觉检测的真实路径,如图 10 所示。图 10 中拟合方程为 $y = -0.19x^2 - 0.02x - 0.003$, 二次项系数误差为 5%,拟合曲线与实际焊缝形状基本吻合,证明该算法准确率较高,可符合工程应用中对曲线焊缝跟踪的要求。

综合上述两组针对直线与曲线焊缝的跟踪实验结果,证明本文采用的 KCF 跟踪算法可靠,可以满足激光焊接时的焊缝跟踪要求。

5 结 论

针对激光焊接的焊缝识别与跟踪问题进行研究。首先,将激光焊接头光路与 CCD 视频监测光路

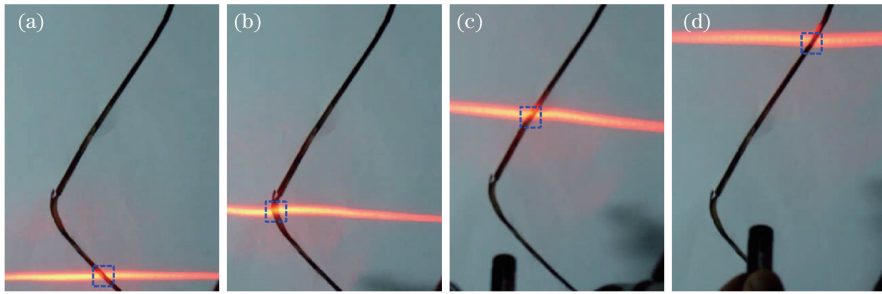


图9 一字激光引导曲线焊缝跟踪过程。(a)初始位置;(b)1/3处;(c)2/3处;(d)结束位置

Fig. 9 Laser-guided curve seam weld tracking process. (a) Start point; (b) 1/3 point; (c) 2/3 point; (d) end point

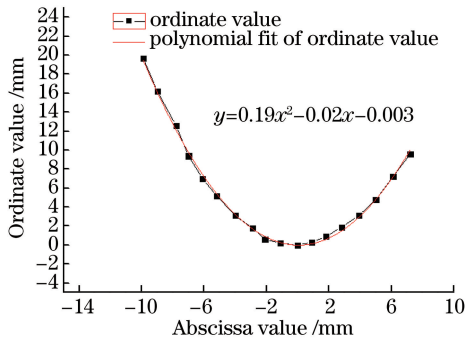


图10 曲线焊缝目标拟合曲线

Fig. 10 Target fitting curve of curved welds

集成为一个系统。然后,提出基于一字线结构激光照明与 CCD 视频成像的焊缝跟踪方法,并建立了相应的激光三角测量模型。接着,对焊接区的图像采用中值滤波和二值化处理,获得焊缝中心坐标,并求得其在世界坐标系下的坐标值。最后,采用 KCF 目标跟踪算法,实现对直线焊缝和曲线焊缝目标的定位和跟踪。实验结果表明,CCD 跟踪所获得的焊缝直线和曲线与实际焊缝直线或曲线吻合度较高,可满足实际工程应用对焊缝跟踪精度及速度的要求,证明了本文跟踪方法的有效性与精确性。

参 考 文 献

- [1] Yang Z H. Pivotal technology development of shipping welding robot system[J]. Electric Welding Machine, 2005, 35(6): 29-33.
杨宗辉. 船舶焊接机器人系统关键技术进展[J]. 电焊机, 2005, 35(6): 29-33.
- [2] Lü J, Lü X Q. The research status of seam tracking for welding robot[J]. Welding Digest of Machinery Manufacturing, 2017(1): 18-25, 48.
吕健, 吕学勤. 焊接机器人轨迹跟踪研究现状[J]. 机械制造文摘(焊接分册), 2017(1): 18-25, 48.
- [3] Jiang L P, Huang J Q, Zou Y, *et al.* Research on automatic tracking system of welding robot [J]. Electric Welding Machine, 2009, 39(1): 39-44.

蒋力培, 黄继强, 邹勇, 等. 焊接机器人自动跟踪系统研究[J]. 电焊机, 2009, 39(1): 39-44.

- [4] Zhu X H, Tian S Y, Shi R S, *et al.* A new detective distance sensor by diffuse reflection laser [J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(12): 3440-3445.
朱晓华, 田松亚, 史如森, 等. 一种新型漫反射空间测距传感器[J]. 光学学报, 2009, 29(12): 3440-3445.
- [5] Le J, Zhang H, Ye Y H, *et al.* Tracking of fillet weld with drain holes based on mobile welding robot [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2016, 50(12): 1893-1897.
乐健, 张华, 叶艳辉, 等. 存在流水孔的角焊缝移动焊接机器人跟踪[J]. 上海交通大学学报, 2016, 50(12): 1893-1897.
- [6] Xu P Q, Tang X H, Lu F G, *et al.* Review on vision sensing system based on robotic welding[J]. Welding & Joining, 2005(8): 11-14.
徐培全, 唐新华, 芦凤桂, 等. 基于机器人焊接的视觉传感系统研究综述[J]. 焊接, 2005(8): 11-14.
- [7] Yan Z G, Xu D, Li Y, *et al.* Automated robotic welding based on teaching and visual correction[J]. Robot, 2007, 29(3): 256-260.
鄢治国, 徐德, 李原, 等. 基于示教与视觉纠偏的机器人自动焊接方法研究[J]. 机器人, 2007, 29(3): 256-260.
- [8] 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.
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.
- [9] Cui W T, Cao Y Y, Huang J F, *et al.* Research on automatic tracking algorithm of the pipeline welding robot based on laser seam tracking [J]. Journal of Beijing Institute of Petro-Chemical Technology, 2010, 18(1): 9-13.

- 崔卫韬, 曹莹瑜, 黄军芬, 等. 基于激光跟踪的管道焊接机器人跟踪算法研究[J]. 北京石油化工学院学报, 2010, 18(1): 9-13.
- [10] Li L, Lin B Q, Zou Y B. Study on seam tracking system based on stripe type laser sensor and welding robot[J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(5): 0502005.
李琳, 林炳强, 邹焱飏. 基于条纹式激光传感器的机器人焊缝跟踪系统研究[J]. 中国激光, 2015, 42(5): 0502005.
- [11] Jia X G. Analysis on arc-welding robot visual control tracking system [J]. Machinery Design & Manufacture, 2009(5): 63-65.
贾小刚. 焊接机器人视觉焊缝跟踪系统分析[J]. 机械设计与制造, 2009(5): 63-65.
- [12] Wang X P, Bai R L. Design of welding robot system based on laser vision[J]. Coal Technology, 2014, 33(7): 206-208.
王秀平, 白瑞林. 基于激光视觉引导的焊接机器人系统设计[J]. 煤炭技术, 2014, 33(7): 206-208.
- [13] Huang J F, Huang M S, Cao Y Y, *et al.* Research on the seam positioning recognition system of laser tracking style rail-free welding robot [J]. Electric Welding Machine, 2008, 38(6): 13-15.
黄军芬, 黄民双, 曹莹瑜, 等. 激光跟踪式无导轨焊接机器人及其焊缝位置识别系统研究[J]. 电焊机, 2008, 38(6): 13-15.
- [14] Jiang J G. Research on laser vision sensor image processing of seam tracking [J]. Mechanical Engineer, 2015(10): 84-87.
姜家高. 焊缝跟踪的激光视觉传感器图像处理研究[J]. 机械工程师, 2015(10): 84-87.
- [15] Liu L Y, Qian X N. Application and study of the laser seam tracking system based on arc-welding robot[J]. Journal of Hunan University of Science & Technology (Natural Science Edition), 2010, 25(3): 63-66.
刘凌云, 钱新恩. 弧焊机器人激光焊缝跟踪系统的应用研究[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版), 2010, 25(3): 63-66.
- [16] Yuan H L, Liu J C, Yi J M, *et al.* Robot automatic tracking system of complex weld for medium thick plate[J]. Electric Welding Machine, 2015, 45(7): 35-39.
袁海龙, 刘建春, 易际明, 等. 中厚板复杂焊缝机器人自动跟踪系统[J]. 电焊机, 2015, 45(7): 35-39.
- [17] Henriques J F, Caseiro R, Martins P, *et al.* High-speed tracking with kernelized correlation filters[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2015, 37(3): 583-596.
- [18] Zhang L, Wang Y J, Liu Y Y, *et al.* Visual object tracking algorithm based on correlation filters [J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2015, 26(7): 1349-1357.
张雷, 王延杰, 刘艳滢, 等. 基于相关滤波器的视觉目标跟踪方法[J]. 光电子·激光, 2015, 26(7): 1349-1357.
- [19] Pan Z F, Zhu Y L. Kernelized correlation filters object tracking method with multi-scale estimation [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(10): 101501.
潘振福, 朱永利. 多尺度估计的核相关滤波器目标跟踪方法[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(10): 101501.
- [20] Yang D D, Cai Y Z, Mao N, *et al.* Long-term object tracking based on kernelized correlation filters [J]. Optics and Precision Engineering, 2016, 24(8): 2037-2049.
杨德东, 蔡玉柱, 毛宁, 等. 采用核相关滤波器的长期目标跟踪[J]. 光学精密工程, 2016, 24(8): 2037-2049.