

激光视觉引导的管道焊缝识别与跟踪系统

杨书娟, 蒋毅*, 俞建峰, 化春键

江南大学机械工程学院江苏省食品先进制造装备技术重点实验室, 江苏 无锡 214122

摘要 为了提高工业上管道焊接的自动化水平,快速准确地识别焊缝是关键,针对此问题设计了一种针对管道母线焊缝的激光视觉引导的焊缝跟踪系统。利用 CCD 工业相机获取包含激光条纹的焊缝图像,对图像进行数字化滤波、阈值分割、感兴趣区域提取后确定激光条纹的位置;然后对激光条纹使用改进的几何中心算法进行细化处理,利用曲线拟合和特征点识别算法获取焊点的二维坐标;最后根据相机成像原理对焊缝特征点进行三维重建,将焊点坐标从图像坐标系转换到机器人基坐标系下指导机器人自动焊接。实验结果表明,该系统对焊点的识别误差均在 0.5 mm 之内,识别效率和焊缝特征点提取精度高,满足机器人自动焊接的生产要求。

关键词 成像系统; 焊缝跟踪; 特征提取; 三维重建; 自动焊接

中图分类号 TP391.41

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.1611003

Laser Visual Guided Pipeline Weld Seam Identification and Tracking System

Yang Shujuan, Jiang Yi*, Yu Jianfeng, Hua Chunjian

Jiangsu Key Laboratory of Advanced Food Manufacturing Equipment & Technology, School of Mechanical Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214122, Jiangsu, China

Abstract A fundamental way to improve the automation level of pipeline welding in industries is to quickly and accurately identify the weld. To solve this problem, we designed a laser vision-guided seam tracking system for pipeline bus weld. The seam image containing laser stripes was obtained using a CCD industrial camera, and the position of the laser stripes was determined after digitizing the image, threshold segmentation, and region of interest area extraction. Then, we reduced the laser stripes in the images using the improved geometric center algorithm. Furthermore, we obtained the two-dimensional coordinates of the solder points using the curve fitting and feature point recognition algorithm. Finally, we reconstructed the three-dimensional weld feature points using the principle of camera imaging and transformed the coordinates of the weld points from the image coordinate system to the robot base coordinate system to guide the robot to autoweld. The experimental results show that the recognition errors of the solder joints are all within 0.5 mm. Additionally, the recognition efficiency and accuracy of the seam feature point extraction are high, which meet the production requirements of robot automatic welding.

Key words imaging systems; weld seam tracking; feature extraction; three-dimensional reconstruction; automatic welding

1 引言

随着我国石油天然气等资源的不断开采和使用,运输这些资源的管道铺设需求量也在逐年增加,但是这些管道直径大、管壁厚,并且人工焊接难度大、效率低,已经成为了管道铺设的难点之一,因此管道焊接自动化成为目前研究的热点问题。实现管道自动化焊接

首先需要解决的问题是如何快速准确地识别焊缝位置进而引导执行机构实现焊接,即焊缝的识别、跟踪。焊缝跟踪传感器有很多种类^[1],早前的直接接触式的电弧传感器、电磁传感器等由于价格低廉、结构简单、易于实现而被大量使用。近年来,随着机器视觉相关技术的快速发展^[2],基于视觉传感器的焊缝自动识别跟踪技术受到广泛关注,通常分为主动视觉和被动视觉

收稿日期: 2021-06-15; 修回日期: 2021-06-29; 录用日期: 2021-07-09

基金项目: 国家自然科学基金(51675233)

通信作者: *jiangyi@jiangnan.edu.cn

两类,受焊接环境的制约,主动视觉方案以其独特的优点得到了广泛的应用。

目前焊缝跟踪系统^[3]一般由激光视觉传感器、控制器和机械臂等部分构成,由线激光和工业相机组成的激光视觉传感器采集焊缝图像,运用图像处理技术^[4]对焊缝图片进行处理识别焊缝特征点,重建特征点的坐标三维(3D)引导机械臂完成运动。激光投射到金属表面,会反射产生亮光,以及焊接环境昏暗等因素都会干扰焊缝图像的采集,为了尽量避免这些外在因素的影响,一般会在镜头前面加一个滤光片去除其他光的干扰从而提高图像采集的质量。

徐德等^[5]利用双目激光视觉传感器采集焊缝图像经过信息融合获取特征点三维坐标,精度高、实时性好,但是视觉系统标定、计算复杂;刘习文等^[6]利用 Radon 变换检测激光条纹后,通过图像分割识别特征点,算法运行速度快、抗干扰较强、识别效果好,但是由于 Radon 变换只能检测出直线,故只适用于 V 型焊缝的识别与跟踪;孙浩益等^[7]提出一种基于卡尔曼滤波器的焊缝识别算法,通过构建约束方程对视觉传感器识别结果进行修正,精度较高。目前大多数的研究都主要集中在 V 型、T 型和搭接焊缝等类型的焊缝,当线激光照射在具有这些类型的焊缝工件表面时,激光条纹连续且非焊接区激光条纹均为直线,运用各种直线检测算子便可以找出焊缝的特征点。

本文针对工业大直径管道母线焊缝图像的特点,对图像进行了滤波处理和阈值分割;提出了几何中心线提取算法对激光条纹进行单骨架的中心线提取,并根据管道焊缝的激光条纹的特点,采用激光条纹断裂部分的中点作为焊缝特征点进行提取,从而准确地确定焊缝位置;利用相机成像原理和空间坐标变换对特征点进行三维重建,确定了特征点在机器人基坐标系的位置,引导机器人完成焊缝识别与跟踪。

2 激光视觉传感系统

2.1 激光视觉传感器结构

针对激光投射以及相机成像原理进行分析计算,

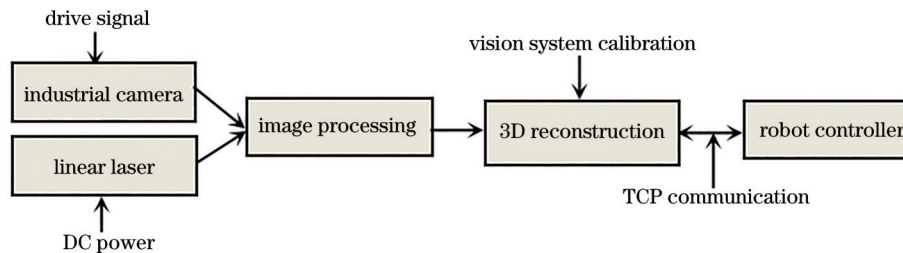


图 2 激光视觉传感器工作流程图
Fig. 2 Flow chart of laser vision sensor

工作时,如图 1(b)所示的激光传感器投射出一字

所设计的主动光源式激光视觉传感器主要包含线结构光传感器、CCD 工业相机和滤光片,机械结构安装方式如图 1(a)所示。

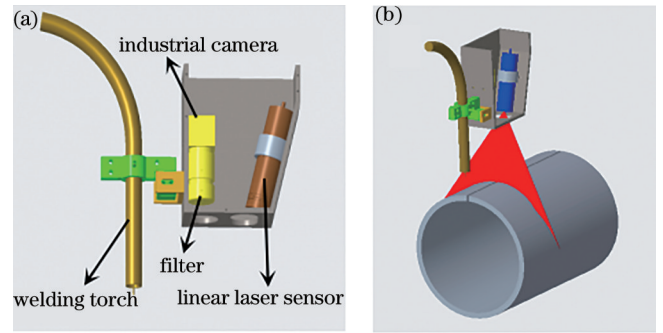


图 1 激光视觉传感系统。(a)激光视觉传感器机械结构;(b)传感器工作示意图

Fig. 1 Laser vision sensing system. (a) Mechanical structure of laser vision sensor; (b) working diagram of sensor

本系统工作时相机距离工件的距离约为 140~180 mm,为了使相机采集焊缝图像时激光光带位于相机成像视野中央,在设计时激光传感器的中心线和相机的中心线有 15°的夹角,焊枪和相机的中心线保持平行。在图像采集时,为了减小焊接的飞溅和焊炬对图片采集质量的影响,选择在镜头前端加装一个与激光传感器同波段的窄带滤光片,只允许红光透过,去除焊接过程其他光的干扰,另外相机和激光器在焊缝的方向上相对于焊枪有一定的安装距离的超前,在很大程度上减小了飞溅和焊炬对激光条纹图像采集的影响。为了防止焊接时剧烈的弧光和电火花对传感器造成损害,将视觉传感器封装在保护外壳中,整套装置小巧轻便,安装在机器人手臂末端的焊枪上指导焊枪进行焊缝识别跟踪。

2.2 激光视觉传感器工作原理

激光视觉传感器工作的具体流程如图 2 所示。激光传感器在工作前经过精确的标定,得到工业相机的内外参矩阵^[8]、线激光平面方程^[9]、手眼变换矩阵^[10]和焊枪末端到机器人 6 轴末端法兰的转换矩阵^[11],即可确定图像从二维坐标到实际三维坐标的转换关系^[12]。

带条纹,CCD 相机根据驱动信号的频率采集具有激光条纹的焊缝图像并通过 USB 传输给上位机。上位机

利用图像处理算法获得焊缝特征点在图像坐标系中的坐标;利用相机标定结果以及线激光平面的方程求得特征点在相机坐标系下的坐标;利用手眼标定的结果将特征点坐标转换到焊枪工具坐标系中;利用工具坐标系标定结果和机器人的实时位姿数据求得特征点在机器人基坐标系中的坐标,实现焊缝特征点的三维重建^[13]。将所得特征点坐标利用传输控制协议(TCP)通信传输给机器人控制器指导机器人跟踪焊缝,从而实现自动焊接。

3 焊缝图像识别算法

目前大多数的研究都针对于V型、搭接、拼接等类型焊缝的识别,这些类型的焊缝所在工件表面一般为平面,线激光投射到工件表面和焊缝上面的激光条纹连续且为直线,针对这些类型的焊缝目前已经有成熟成熟的直线检测算法去识别焊缝、寻找特征点。而本

文专门针对于管道焊缝进行焊缝识别,焊缝处于曲面上。当线激光投射到工件表面时激光条纹产生断裂且为曲线,然后针对此种焊缝的特点进行图像识别算法开发。各种类型的焊缝以及线结构光投射到工件表面形成的激光条纹如图3所示。

视觉传感器在图像采集过程中,为了使激光条纹显著,在保证图像清晰的情况下将镜头的光圈调到尽量小,管道焊缝在线结构光的投射下,形成一条断裂的激光条纹曲线,断裂处即为焊缝。图像处理识别算法主要包括图像滤波、阈值分割、感兴趣区域(ROI)提取、激光条纹中心线提取、曲线拟合和焊缝特征点提取,对图3(h)的一张焊缝原始图像(2592 pixel×1944 pixel)进行焊缝特征点识别,但是由于实验室条件制约,该图片是在模拟焊接过程中采集的。焊缝识别算法的整体流程^[14]如图4所示。

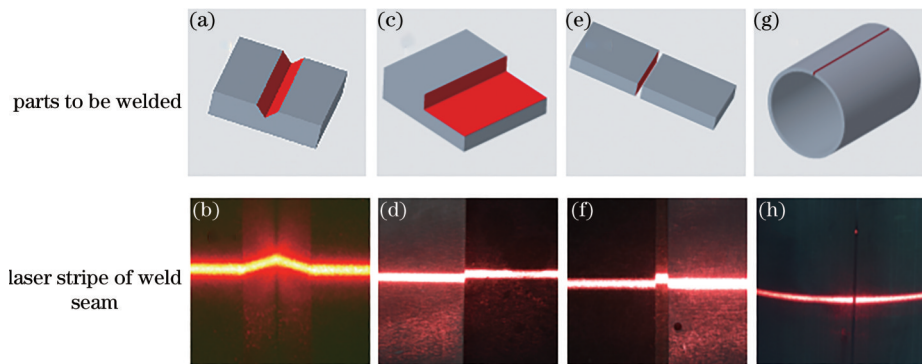


图3 不同焊缝及对应激光条纹图。(a)(b) V型焊缝;(c)(d)搭接焊缝;(e)(f)拼接焊缝;(g)(h)管道焊缝

Fig. 3 Different weld seams and corresponding laser stripe patterns. (a) (b) V weld seam; (c) (d) lap weld seam; (e) (f) butt weld seam; (g) (h) pipe weld seam

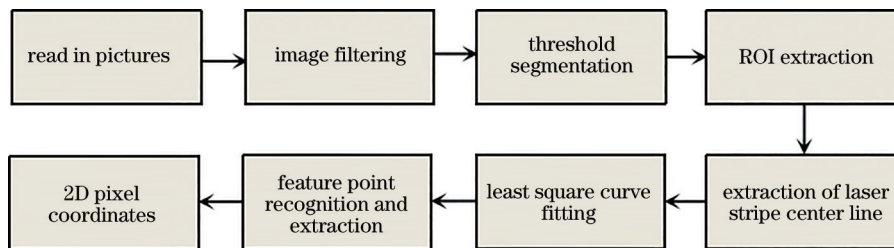


图4 焊缝识别算法的整体流程

Fig. 4 Overall flow of the weld seam recognition algorithm

3.1 焊缝图像预处理

从焊缝原始图像可以看出,激光投射在曲面的管道上面,焊缝附近的激光条纹亮度较大,管道上面的划痕也会产生亮光,对特征点的提取造成干扰,为了消除这些影响,需要对图像进行预处理,主要包括图像滤波、阈值分割、形态学处理。

常见的滤波算法有中值滤波、均值滤波和高斯滤波。均值滤波对模板中的像素无差别的平均化会造成图像的边缘模糊,降低目标和背景的对比度,并会对后面提取激光条纹中心线造成干扰。高斯滤波仅对于服

从正态分布的高斯噪声比较有效。中值滤波像素点的灰度值由该像素点邻域灰度值的中值所确定,能够抑制噪声、消除孤点并且能够很好地保护激光条纹边缘,故选用中值滤波去除图像中的噪声,分别选取5 pixel×5 pixel、7 pixel×7 pixel、9 pixel×9 pixel和11 pixel×11 pixel的模板进行中值滤波,中值滤波后的图像(为了显示效果已裁剪)如图5所示。

从图5滤波结果可以看出,随着模板尺寸的增大,激光条纹周围的毛刺逐渐被滤除,激光条纹边缘逐渐平滑,背景和激光带的对比度逐渐增强,有利于图像的阈

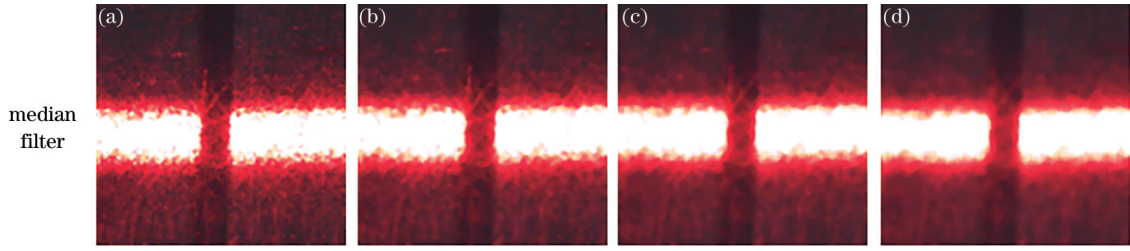


图 5 不同模板下图像中值滤波结果。(a) 5 pixel×5 pixel; (b) 7 pixel×7 pixel; (c) 9 pixel×9 pixel; (d) 11 pixel×11 pixel
Fig. 5 Image median filter results under different templates. (a) 5 pixel×5 pixel; (b) 7 pixel×7 pixel; (c) 9 pixel×9 pixel; (d) 11 pixel×11 pixel

值分割,但是随着模板尺寸的增大,算法效率逐渐降低,综合考虑选取 9 pixel×9 pixel 的模板进行中值滤波。

图像的阈值分割是将图片中前景和背景分开的处理方法。图像的阈值分割算法是根据图像像素的灰度值与给定阈值 T_d 的比较,若灰度值大于给定阈值则该像素变为白色,反之则变成黑色,经过阈值分割,图像就变成了只有黑色和白色的二值图像,从而将目标与背景区分开,其中阈值的确定是最为关键的,直接影响分割的准确性。图像阈值分割后像素点的灰度值 $G(u, v)$ 表示为

$$G(u, v) = \begin{cases} 0, & f(v, u) < T_d \\ 255, & f(v, u) > T_d \end{cases} \quad (1)$$

式中: $f(u, v)$ 为原始图像的灰度值。

常见的阈值分割算法有直方图双峰法和最大类间方差(Otsu)算法等。直方图双峰法适用于直方图中有明显的两个及以上波峰的图像,利用 MATLAB 绘制焊缝图像的直方图,如图 6(a)所示,可以看出无明显的双峰,分割结果如图 6(b)所示,无法准确地区分背景和前景,不适用于本文焊缝图像的阈值分割。

故选用目前普遍使用的阈值分割算法之一的最大类间方差法对焊缝图像进行阈值分割,该算法是一种针对不同的焊缝图像自动求取阈值的算法,在判决分析最小二乘原理的基础上推导所得,计算过程简单,也是一种比较稳定的算法。基本原理如下。

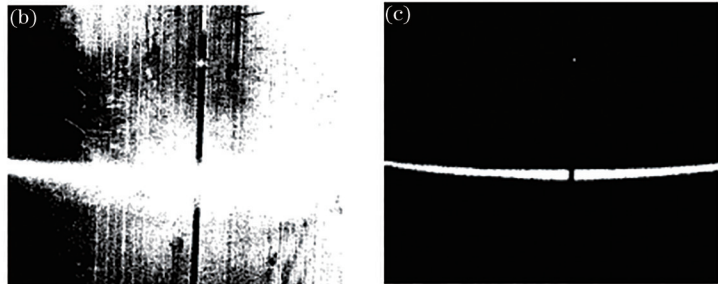
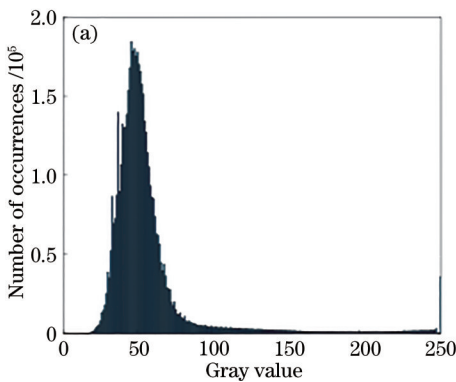


图 6 不同方法阈值分割结果。(a)灰度直方图;(b)直方图双峰法阈值分割;(c)最大类间方差法阈值分割
Fig. 6 Threshold segmentation results of different methods. (a) Gray histogram; (b) histogram bimodal threshold segmentation; (c) Otsu threshold segmentation

设图像中灰度为 i 的像素数为 n_i , 灰度范围为 $[0, L-1]$, 则总的像素数 N 为

$$N = \sum_{i=0}^{L-1} n_i \quad (2)$$

各灰度出现的概率 p_i 为

$$p_i = \frac{n_i}{N} \quad (3)$$

把图像中的像素用 T_d 分为两类 C_0 和 C_1 , C_0 由在 $[0, T_d-1]$ 区间的像素组成, C_1 由在 $[T_d, L-1]$ 区间的像素组成, 则区域 C_0 和 C_1 的概率 P_0 和 P_1 分别表示为

$$P_0 = \sum_{i=0}^{T_d-1} p_i \quad (4)$$

$$P_1 = \sum_{i=T_d}^{L-1} p_i = 1 - P_0 \quad (5)$$

区域 C_0 和 C_1 平均灰度 μ_0 和 μ_1 分别表示为

$$\mu_0 = \frac{1}{P_0} \cdot \sum_{i=0}^{T_d-1} (i \cdot p_i) = \frac{\mu(T_d)}{P_0} \quad (6)$$

$$\mu_1 = \frac{1}{P_1} \cdot \sum_{i=T_d}^{L-1} (i \cdot p_i) = \frac{\mu - \mu(T_d)}{1 - P_0} \quad (7)$$

式中: μ 是整幅图的平均灰度。

$$\mu = \sum_{i=0}^{L-1} (i \cdot p_i) = \sum_{i=0}^{T_d-1} (i \cdot p_i) + \sum_{i=T_d}^{L-1} (i \cdot p_i) = P_0 \cdot \mu_0 + P_1 \cdot \mu_1 \quad (8)$$

两个区域的总方差为

$$\sigma^2 = P_0 \cdot (\mu_0 - \mu)^2 + P_1 \cdot (\mu_1 - \mu)^2 = P_0 \cdot P_1 \cdot (\mu_0 - \mu_1)^2 \quad (9)$$

让 T_d 在 $[0, L-1]$ 范围内依次取值, 使得 σ^2 最大的 T_d 值便是最佳的图像二值化分割阈值。

运行该算法对滤波后的焊缝图像进行阈值分割求取的阈值 $T_d=127$, 二值化结果如图 6(c) 所示, 该算法能够准确地将激光条纹目标和背景区分开, 所以选用最大类间方差法进行图像阈值分割。经过阈值分割激光条纹去提取中心线已经有很好的效果, 所以图像预处理没有对图像进行形态学运算。

3.2 激光条纹细化

常用的细化算法^[15]有 Hough 变换、Radon 变换、Hilditch 法和几何法。分析图 6(c) 二值化的焊缝图像的特点可知, 该激光条纹为曲线, 而 Hough 变换、Radon 变换是专门针对 V 型焊缝激光条纹细化的直线检测算法, 不适用于曲线焊缝条纹提取, 故只对 Hilditch 法和几何法进行讨论分析。

Hilditch 细化算法步骤为: 对二值图自左往右自上而下地扫描每个像素点, 扫描一遍为一个迭代周期, 依次对每一个像素点进行相关条件判断, 决定该像素点是否需要删除, 直到不存在需要删除的像素点时停止迭代。焊缝图像经过 Hilditch 算法细化后结果如图 7 所示(已裁剪), 可以看出, 该细化算法虽然提取的中心线连续不间断, 但不是单像素宽度的条纹骨架, 会干扰后续激光条纹中心线曲线的拟合, 条纹断裂处的毛刺也会对特征点的识别产生干扰。



图 7 Hilditch 细化算法激光条纹中心线提取结果

Fig. 7 Extraction results of laser stripe center line based on Hilditch thinning algorithm

针对管道激光条纹的特殊性, 为了降低中心线提取出现毛刺的可能性, 对现有的几何中心线提取算法加以优化, 算法执行的步骤如图 8 所示。

1) 读入二值化的图像, 确定 ROI。图像采集时, 传感器和工件表面距离基本保持不变, 故激光条纹的宽度基本相同, 约为 170 个像素点。查找二值化图像第一列第一次出现灰度值为 255 的行数记做 R , 将此行数减去 50 个像素作为 ROI 起始行数, 将此行数加上 200 个像素作为 ROI 的结束行数, 则 ROI 范围为 $(R-50) \sim (R+200)$, 既保证了激光条纹完全包含在内, 又提高了算法运行效率, 同时减小激光条纹之外范围由于焊接飞溅对图像处理的干扰。

2) 确定激光条纹上、下边界。在 ROI 范围内, 依次查找每一列中第一个出现灰度值为 255 的像素点作为激光条纹的上边界, 并记录其所在图像的行数、列数, 存入数组 R_1 中, 其中数组的下标与列数一致, 数组的内容保存的是上边界的行数值; 查找每一列中最后

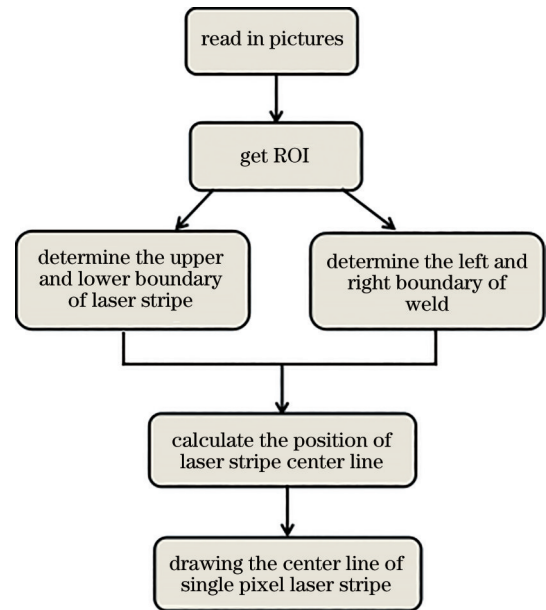


图 8 几何中心算法流程图

Fig. 8 Flow chart of geometric center algorithm

一个出现灰度值为 255 的像素点作为激光条纹的下边界, 并记录其行数、列数, 存入数组 R_2 中。依次循环每一列, 求取每一列的上下边界行列数据。

3) 针对激光条纹断裂处特殊处理。在焊缝处, 激光条纹断裂, 在确定激光条纹上下边界的过程中, 遍历 ROI 范围所有行数, 始终无灰度值为 255 的像素点出现。单独针对此情况将此时记录激光条纹上下边界所在的行数的数组对应元素 R_1 和 R_2 均赋值为 0, 列数与数组下标保持一致。同时记录第一次出现该情况的列数将其保存在变量 C_L 中, 作为焊缝的左边界; 记录最后一次出现该情况的列数, 将其保存在变量 C_R 中, 作为焊缝的右边界。

4) 计算激光条纹中心。利用几何中心法, 求取激光条纹中心所在的行数存入数组 R_M 中, 特别地, 在焊缝条纹断裂处, 激光中心点所在的行数则为 0。

$$R_M = \frac{R_1 + R_2}{2} \quad (10)$$

5) 提取激光条纹中心线。将整幅图所有像素点的灰度值全部赋值为 0, 遍历图像每一列, 将 R_M 中保存的对应不为 0 的行数灰度值赋值为 255, 并进行条纹中心线的绘制。

根据上述算法进行激光条纹中心线的提取, 提取结果如图 9 所示, 该算法提取的中心线虽偶有断点但为完美的单像素骨架, 方便激光中心线的曲线拟合并提高拟合准确度。



图 9 几何中心法激光条纹中心线提取结果

Fig. 9 Extraction results of laser stripe center line by geometric center method

3.3 焊缝图像特征点识别

焊缝图像的特征点识别是根据条纹曲线的特点在曲线上选择合适的点作为焊缝的特征点,而经过几何中心法提取到的激光条纹中心线像素坐标之间不存在关联,因此无法由固定的特征准确地求出焊缝特征点在图像中的像素坐标,所以在特征点识别之前需要求出激光条纹中心线的方程。

条纹中心线方程^[16]求解采用最小二乘法进行拟合^[17]。根据图 8 的激光条纹中心线提取结果,初步确定曲线方程为二次多项式,

$$u = P_0 + P_1 \cdot v + P_2 \cdot v \cdot v, \quad (11)$$

式中: u 是特征点的行数; v 是特征点的列数; P_0 、 P_1 和 P_2 分别为常数项、一次项和二次项系数。以图像的左上角为原点建立像素坐标系。以提取中心线时中心点所在的非零的行数和列数的数据为样本点进行最小二乘法曲线拟合,拟合结果表示为

$$u = 1094.353441 + 0.136226v - 0.000049v^2. \quad (12)$$

对于管道焊缝,根据中心线提取结果将其简化成图 10 所示的模型,将过条纹断裂处中点的列和拟合完成的激光条纹曲线的交定义为焊缝的特征点。

然后求解特征点的像素坐标。在提取激光条纹中心线时,得到了焊缝的左右边界的列数,分别记录在 C_L 和 C_R 中,计算焊缝中点所在的列数 C_{ol} ,表示为

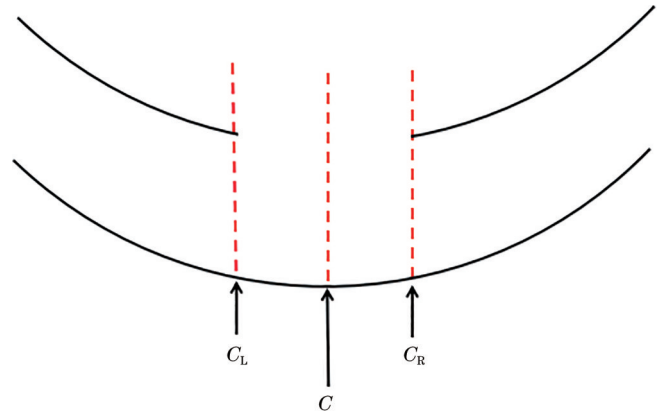


图 10 特征点提取模型示意图

Fig. 10 Sketch of feature point extraction model

$$R_{ol} = \frac{R_L + R_R}{2}. \quad (13)$$

求解出焊缝中点所在的列数,将其作为变量 v 代入式(4)的焊缝曲线方程中,求解出特征点所在的行数记做变量 R_{ow} ,即特征点的像素坐标为 (C_{ol}, R_{ow}) 。

3.4 焊缝图像处理耗时

为了满足焊缝跟踪系统对焊缝特征点识别算法的实时性要求,系统采取多线程并行工作的架构,主要包括了图像采集线程、图像处理线程和机器人运动控制线程,如图 11 所示。

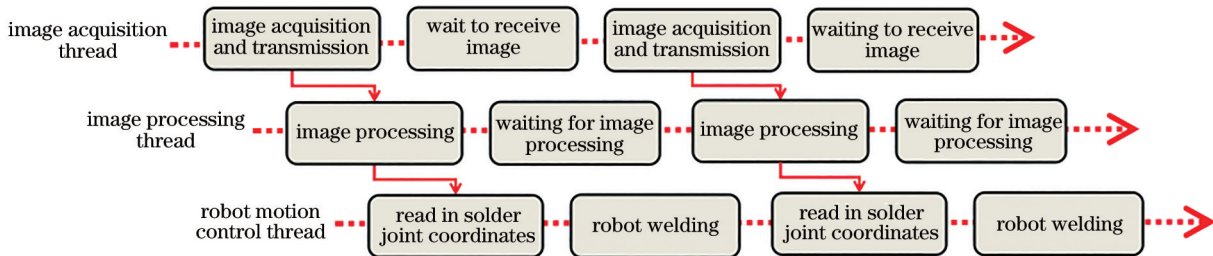


图 11 系统多线程并行示意图

Fig. 11 System multi thread parallel diagram

在图像采集线程中,当工控机向相机发送图像触发采集信号后,开始采集传输图像,将图像传输给图像处理线程,同时图像采集线程迅速恢复至等待接收图像的状态;在图像处理线程中,接收到图像采集线程传输的图像开始进行图像处理算法,图像处理完成后将算法求得的焊缝特征点传输给机器人运动控制线程,同时图像处理线程恢复至等待图像处理的状态。图像处理过程中算法耗时主要集中在图像中值滤波和图像的阈值上,算法完成一次图像采集传输与处理所耗时小于机器人运动控制周期,加之图像处理到得到焊点相对于焊枪焊接的焊点有一定的超前量,待焊接坐标点序列始终存在冗余,满足算法实时性要求。图像处理算法各步骤耗时如表 1 所示。

表 1 图像处理算法步骤耗时

Table 1 Time consuming of image processing algorithm steps

Algorithm steps	Time consuming /ms
Image acquisition and transmission	40
Median filter	32
Threshold segmentation	15
Extraction of laser stripe center line	1
Feature point recognition	1
3D reconstruction	1

4 焊缝特征点三维重建

焊缝图像只包含了平面二维信息,而丢失了工件的三维信息,无法直接引导机器人运动,为了实现机器人自动焊接需要对焊缝特征点进行三维重建,三维重

建的流程如图 12 所示。

在传感器工作过程中,线激光投射在工件上形成激光条纹,所以特征点在管道工件上,同时也处于结构光所在的平面上,如图 13 所示,线激光平面和焊缝确定焊点 P ,经过工业相机成像,在像平面成像点 p ,其中

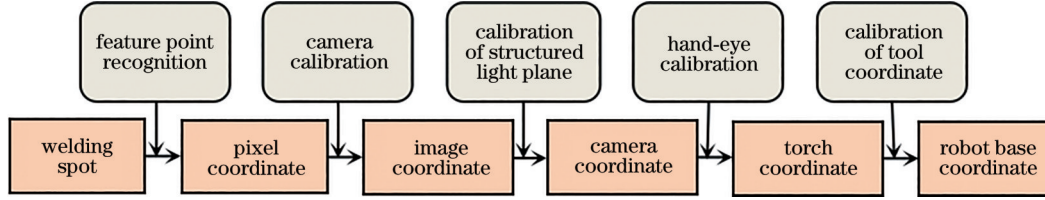


图 12 三维重建流程图

Fig. 12 Flow chart of 3D reconstruction

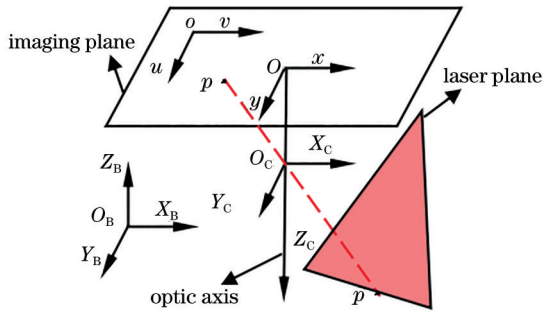


图 13 焊点成像示意图

Fig. 13 Solder joint imaging diagram

根据视觉标定^[18]结果可知,摄像机内参矩阵 M_C 、手眼关系矩阵 $T_{\text{eye_in_hand}}$ 和线激光平面在相机坐标系下的方程,如下式所示,焊枪末端到机器人基坐标系的转换矩阵 T_B 通过机器人工具坐标系标定后可以直接从示教器读出。

$$M_C = \begin{bmatrix} \frac{f}{d_x} & 0 & v_0 \\ 0 & \frac{f}{d_y} & u_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (14)$$

$$Z_C = a_0 + a_1 \cdot X_C + a_2 \cdot Y_C. \quad (15)$$

根据像素坐标系和图像坐标系的定义,焊点在图像坐标系中的坐标表示为

$$\begin{cases} x = (u - u_0) \cdot d_x \\ y = (v - v_0) \cdot d_y \end{cases}, \quad (16)$$

式中: d_x, d_y 为 x, y 方向上像素尺寸;根据焊点成像中的三角形相似原理,可以计算出焊点 P 在图像坐标系坐标 (x, y) 和相机坐标系坐标 (X_C, Y_C, Z_C) 的关系,表示为

$$\begin{cases} X_C = \frac{Z_C}{f} \cdot x \\ Y_C = \frac{Z_C}{f} \cdot y \end{cases}. \quad (17)$$

焊点在线激光平面上,将式(16)、(17)代入式(15)

$u-o-v$ 为像素坐标系, $x-O-y$ 为图像坐标系(原点在图片的中心), $O_C-X_C Y_C Z_C$ 为相机坐标系, $O_B-X_B Y_B Z_B$ 为机器人基坐标系,点 p 在像素坐标系坐标为 (u, v) , 在图像坐标系坐标为 (x, y) , 在相机坐标系坐标为 (X_C, Y_C, Z_C) , 在机器人基坐标系坐标为 (X_B, Y_B, Z_B) 。

的激光平面方程中,可以解出焊点 P 在相机坐标系下的坐标 (X_C, Y_C, Z_C) , 表示为

$$\begin{cases} X_C = \frac{a_0 \cdot (v - v_0) \cdot d_x}{f - a_1(v - v_0) \cdot d_x - a_2(u - u_0) \cdot d_y} \\ Y_C = \frac{a_0 \cdot (u - u_0) \cdot d_y}{f - a_1(v - v_0) \cdot d_x - a_2(u - u_0) \cdot d_y} \\ Z_C = \frac{a_0 \cdot f}{f - a_1(v - v_0) \cdot d_x - a_2(u - u_0) \cdot d_y} \end{cases}. \quad (18)$$

根据图像识别算法和视觉标定结果可以将焊点从像素坐标系变换到机器人基坐标系,求得焊点在机器人基坐标系下的坐标,实现了焊点的三维重建,引导机器人自动焊接。三维重建计算^[19]过程如下式所示。经过三维重建,提取出焊缝特征点在机器人基坐标系下的坐标为 $(-293.876767, 801.136528, -270.970261)$ 。

$$\begin{bmatrix} X_B \\ Y_B \\ Z_B \\ 1 \end{bmatrix} = T_B \cdot T_{\text{eye_in_hand}} \cdot \begin{bmatrix} X_C \\ Y_C \\ Z_C \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (19)$$

5 实验及结果

为了验证本文算法的准确性,搭建了激光视觉焊缝识别与跟踪系统,包括激光传感器、工业相机、镜头,整个激光视觉传感器安装在史陶比尔 TX60 六轴工业机器人法兰末端的焊枪前端,实验平台如图 14(a)所示,以厚度 10 mm、焊缝宽度 3 mm、外径 200 mm 的管道为待焊工件,焊缝上面标记了 13 个实验焊点,如图 14(b)所示,进行焊缝特征点识别的实验。

软件组成:上位机 PC 为 i5 内核、主频为 2.2 GHz,采用 Windows 10 64 位操作系统;图像采集使用大恒相机自带的 SDK,图像处理识别算法由 VS2015 联合 OpenCV 开发。硬件构成:激光传感器为坤扬 KYL650N150-26110 型号的一字激光传感器,输出波长为 650 nm,选择与其波段匹配的滤光片;图像采集设备为大恒 MER-500-7UC 工业相机搭载 KOWA 焦距为 12 mm 的镜头

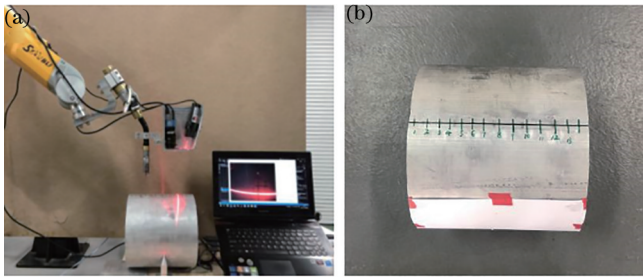


图 14 实验平台实物图。(a)焊缝识别系统;(b)待焊工件
Fig. 14 Physical drawing of experimental platform. (a) Weld identification system; (b) work-piece to be welded

实验过程如图 15 所示。移动机器人使线激光依次与管道上标记的焊点重合,采集 13 张焊缝图像并保存,同时记录采集每张照片时焊枪末端的位姿,如图 15(a)所示。采集完成后移动机器人使焊枪末端依次与标记的焊缝位置重合,记录此时焊枪末端的位姿

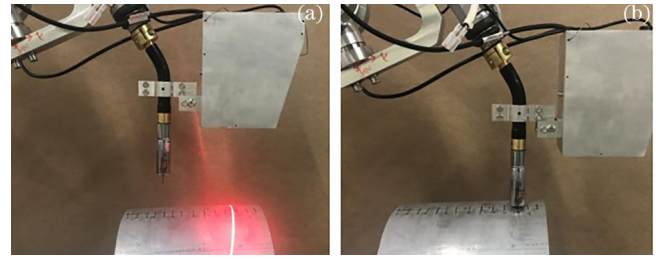


图 15 实验过程。(a)焊缝图像采集过程;(b)焊点实际位置采集过程
Fig. 15 Experimental process. (a) Welding image acquisition process; (b) collection process of actual position of solder joint

数据即为标记焊点在机器人基坐标系下的真实坐标数据,如图 15(b)所示。

运用焊缝识别算法计算焊点在机器人基坐标系下坐标,计算结果如表 2 所示。

表 2 焊缝特征点识别实验结果

Table 2 Experimental results of weld feature points recognition

unit: mm

Serial number	Calculation results of the algorithm	Actual position of solder joint
	(X_B, Y_B, Z_B)	(X, Y, Z)
1	(-140.275749, 695.619647, -273.7334380)	(-140.76, 695.89, -273.70)
2	(-141.284020, 709.684882, -273.4957440)	(-140.91, 709.69, -273.72)
3	(-142.400476, 721.644768, -273.2583509)	(-142.25, 721.73, -272.91)
4	(-143.131597, 734.937567, -272.9155906)	(-143.17, 735.01, -272.82)
5	(-144.276990, 747.246033, -272.6832176)	(-144.11, 747.17, -272.74)
6	(-144.982680, 759.994569, -272.2506655)	(-145.05, 759.71, -272.72)
7	(-146.078632, 778.068779, -272.2707918)	(-146.20, 778.04, -271.92)
8	(-147.248330, 794.282121, -271.6395201)	(-146.91, 794.31, -271.49)
9	(-148.263204, 810.113418, -271.4052630)	(-148.15, 810.29, -271.25)
10	(-149.261270, 825.341429, -270.9301853)	(-149.11, 825.70, -270.81)
11	(-150.429095, 842.641187, -270.6421893)	(-150.87, 842.25, -270.35)
12	(-151.592100, 856.599564, -270.0321142)	(-151.55, 856.27, -270.26)
13	(-152.575688, 869.052328, -269.8101210)	(-152.71, 869.19, -270.19)

对表 2 的实验数据进行分析,分析结果如图 16 所示。根据实验结果可知,焊点实际位置和算法计算出

的位置几乎重合, X、Y、Z 轴误差均在 0.5 mm 之内,满足实际焊接作业的要求。

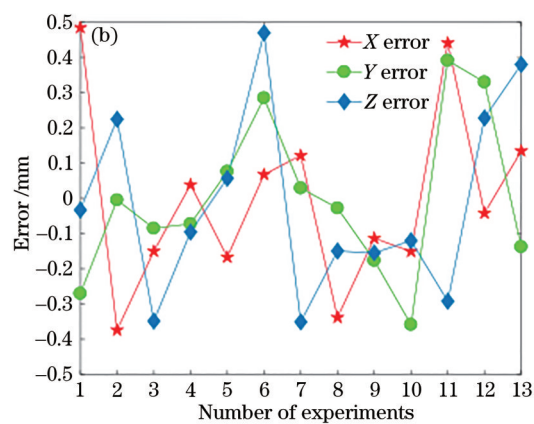
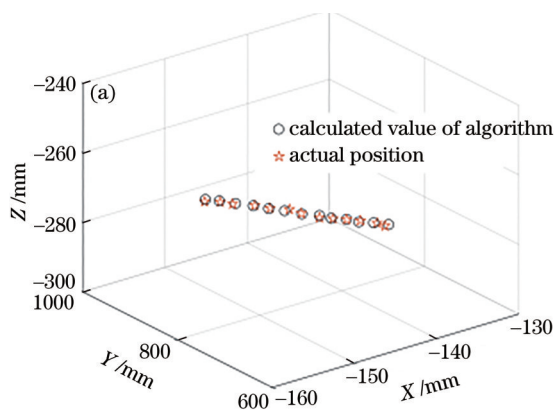


图 16 实验结果分析。(a)焊缝特征点识别情况;(b) X 轴、Y 轴、Z 轴误差

Fig. 16 Analysis of experimental results. (a) Recognition of weld feature points; (b) errors of X-axis, Y-axis, and Z-axis

6 结 论

本文对工业大直径的管道焊缝的识别与跟踪进行研究,在史陶比尔六轴工业机器人上自主研发了激光视觉焊缝识别传感器。首先对采集的管道焊缝图像通过图像预处理得到清晰的激光条纹,然后利用特征点提取算法得到特征点的像素坐标,最后建立特征点的三维重建模型并成功提取了焊缝跟踪点的三维坐标。通过实验验证,本文算法提取得到的特征点和实际的特征点吻合度较高,特征点的识别误差小于 0.5 mm,完全满足大直径工业管道自动焊接的精度要求,证明了本文焊缝识别算法的准确性。

参 考 文 献

- [1] 向进, 杨芙. 基于传感器焊缝跟踪技术发展现状[J]. 中国设备工程, 2021(3): 220-221.
Xiang J, Yang F. The development of seam tracking technology based on sensors[J]. China Plant Engineering, 2021(3): 220-221.
- [2] 朱云, 凌志刚, 张雨强. 机器视觉技术研究进展及展望[J]. 图学学报, 2020, 41(6): 871-890.
Zhu Y, Ling Z G, Zhang Y Q. Research progress and prospect of machine vision technology[J]. Journal of Graphics, 2020, 41(6): 871-890.
- [3] 陈新禹, 张庆新, 朱琳琳, 等. 基于激光视觉传感器的机器人实时焊缝跟踪方法[J]. 激光与红外, 2021, 51(4): 421-427.
Chen X Y, Zhang Q X, Zhu L L, et al. The method of real time seam tracking for robotic welding system based on laser vision sensor[J]. Laser & Infrared, 2021, 51(4): 421-427.
- [4] 刘天元, 鲍劲松, 汪俊亮, 等. 融合时序信息的激光焊接熔透状态识别方法[J]. 中国激光, 2021, 48(6): 0602119.
Liu T Y, Bao J S, Wang J L, et al. Laser Welding Penetration State Recognition Method Fused with Timing Information[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(6): 0602119.
- [5] 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.
- [6] 刘习文, 洪波, 戴铁峰. 激光视觉焊缝跟踪图像处理与坡口识别[J]. 激光与红外, 2011, 41(7): 804-807.
Liu X W, Hong B, Dai T F. Laser vision seam tracking image processing and groove recognition [J] Laser and infrared, 2011, 41 (7): 804-807
- [7] 孙浩益, 梁冬泰, 李国平, 等. 基于卡尔曼滤波器的焊缝识别算法[J]. 激光与红外, 2016, 46(8): 1006-1013.
Sun H Y, Liang D T, Li G P, et al. Weld seam recognition algorithm based on constraint Kalman filter [J]. Laser & Infrared, 2016, 46(8): 1006-1013.
- [8] 冯亮, 谢劲松, 李根, 等. 摄像机标定的原理与方法综述[J]. 机械工程师, 2016(1): 18-20.
Feng L, Xie J S, Li G, et al. Review of camera calibration principles and methods[J]. Mechanical Engineer, 2016(1): 18-20.
- [9] 于龙, 李艳文, 栾英宝, 等. 基于二维平面靶标的线结构光标定[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(6): 124-131.
Yu L L, Li Y W, Luan Y B, et al. Line structured light calibrating based on two-dimensional planar target[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(6): 124-131.
- [10] 任杰轩, 张旭, 刘少丽, 等. 一种高精度机器人手眼标定方法[J]. 现代制造工程, 2020(4): 44-51.
Ren J X, Zhang X, Liu S L, et al. A high precision hand-eye calibration method for robot[J]. Modern Manufacturing Engineering, 2020(4): 44-51.
- [11] 康存锋, 王红伟, 张鹏飞, 等. 焊接机器人工具坐标系标定的研究与实现[J]. 北京工业大学学报, 2016, 42(1): 30-34.
Kang C F, Wang H W, Zhang P F, et al. Study and realization of tool coordinate frame calibration for welding robots[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2016, 42(1): 30-34.
- [12] Kim J W, Bae H S. A study on a vision sensor system for tracking the I-Butt weld joints[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2005, 19(10): 1856-1863.
- [13] 杜健准, 张艳喜, 王静静, 等. 核相关/卡尔曼滤波焊缝路径识别新方法研究[J]. 中国激光, 2022, 49(2): 0202009.
Du J Z, Zhang Y X, Jingjing Wang J J, et al. Weld Path Identification Based on Kernel Correlation/Kalman Filters [J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(2): 0202009.
- [14] 韩东旭, 钟宝江. 基于梯度掩模滤波的边缘细化算法[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(18): 181016.
Han D X, Zhong B J. Edge thinning algorithm based on gradient mask filter[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(18): 181016.
- [15] 吴庆华, 周阳, 李子奇, 等. 双频曲线拟合线结构光条纹中心提取方法[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(14): 141502.
Wu Q H, Zhou Y, Li Z Q, et al. Extracting method for light strip center of linear structural light based on dual frequency curve fitting[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(14): 141502.
- [16] 刘燕, 王刚, 王国栋, 等. 用于机器视觉的焊缝图像获取及图像处理[J]. 计算机工程与应用, 2014, 50(3): 135-140.
Liu Y, Wang G, Wang G D, et al. For machine vision image acquisition and image processing of weld[J]. Computer Engineering and Applications, 2014, 50(3): 135-140.
- [17] 张永涛, 贾延明. 最小二乘法中代数多项式曲线拟合的分析及实现[J]. 计算机与数字工程, 2017, 45(4): 637-639, 654.
Zhang Y T, Jia Y M. Analysis and program implementation of least squares polynomial curve fitting[J]. Computer & Digital Engineering, 2017, 45(4): 637-639, 654.
- [18] 王国琿, 钱克矛. 线阵相机标定方法综述[J]. 光学学报, 2020, 40(1): 0111011.
Wang G H, Qian K M. Review on line-scan camera calibration methods[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(1): 0111011.
- [19] 聂晓波, 陈亚峰. 焊接机器人运动学分析[J]. 自动化仪表, 2013, 34(9): 67-72.
Nie X B, Chen Y F. Kinematics analysis of the welding robot[J]. Process Automation Instrumentation, 2013, 34 (9): 67-72.