

基于多特征融合图像分割的 焊缝检测焊接系统

沈泽鑫^{1,2}, 宋科夫², 张琳琳², 曾辉雄², 李俊²

(1. 福建农林大学 机电工程学院, 福州 350002;

2. 中国科学院海西研究院泉州装备制造研究中心, 福建 泉州 362200)

摘要: 针对工业生产中焊缝检测系统存在易受光照影响、依赖人工和碰撞事故风险高等问题, 开发了一套基于多特征融合分割算法的自动化焊缝检测系统; 系统采用激光深度相机获取焊缝深度图像, 结合多特征融合与斜矩包络线拟合的图像分割算法解决了表面不平整导致的分割难题; 通过标定算法, 确保了焊缝位置坐标和宽度的准确获取; 提出了基于定向包围盒 (OBB) 的避障检测算法, 防止焊接过程中的碰撞; 利用机械臂建立了测试系统; 经实验测试该系统在检测焊缝宽度和定位方面有效, 平均误差分别为 0.302 9 mm 和 0.339 3 mm, 达到工业应用标准; 该系统优化了焊接路径和碰撞检测, 有效提升了焊接质量与生产效率。

关键词: 图像分割; 位姿估计; 路径规划; 自动化系统; 焊缝检测

Seam Detection Welding System Based on Image Segmentation with Multi-feature Fusion

SHEN Zexin^{1,2}, SONG Kefu², ZHANG Linlin², ZENG Huixiong², LI Jun²

(1. College of Mechanical and Electronic Engineering, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China;

2. Quanzhou Institute of Equipment Manufacturing Haixi Institutes, Chinese Academy of Sciences, Quanzhou 362200, China)

Abstract: Welding seam inspection systems have the issues of susceptibility to lighting conditions, reliance on manual operation, and high risk of collision accidents in industrial production, in response to these problems, an automated welding seam detection system based on multi-feature fusion segmentation algorithm is developed. The system employs a laser depth camera to capture depth images of weld seams. It combines the multi-feature fusion with the skew moment envelope fitting in the image segmentation algorithm to overcome the challenges posed by uneven surfaces. The accurate acquisition of weld seam coordinates and width is ensured through the calibration algorithm. Additionally, a collision avoidance detection algorithm based on oriented bounding boxes (OBB) is proposed to prevent collisions during welding process. The system is built by using a robotic arm. Experimental results demonstrate that the system has an effectiveness in detecting weld seam width and positioning, with an average error of 0.302 9 mm and 0.339 3 mm, respectively, meeting industrial application standards. This system optimizes the welding path and collision detection, significantly enhancing welding quality and production efficiency.

Keywords: image segmentation; pose estimation; path planning; automation system; seam detection

0 引言

焊缝检测和焊接工作在机器制造、器械维修、微电子等广泛应用领域中起着关键作用。但随着产业自动化升级和智能制造的迅猛发展, 传统的人工检测和手动焊接方式已无法满足现代制造业对高效、精确和可靠的生产要求^[1]。因此, 实现焊缝检测和焊接的自动化与智能化已成为提高焊接质量、提高生产效率和降低制造成本的迫切需求^[2]。

在这一背景下, 结合视觉算法和机器人技术, 以构建自动化焊缝检测和焊接系统成为了不可避免的发展方向。

许多研究者针对焊缝图像的自动识别进行了大量的研究工作, 文献 [3] 采用机器视觉系统对图像模糊化处理, 得到二维船舶焊缝图像模型; 文献 [4] 提出了一种基于深度学习的金属焊接管道内壁缺陷检测方法, 采用快速卷积神经网络 (Faster RCNN) 实现管道内壁缺陷检测; 文献 [5] 针对传统方法在焊缝起始点检测任务中适应性差, 难以获取机器人初始焊接位姿的问题, 提出一种基于改进 Center-Net 的焊缝起始向量检测与机器人位姿估计方法。

尽管焊缝视觉检测的研究已取得一定的进展, 但仍存在一些需要优化的问题。例如, 针对三原色 (RGB, red

收稿日期: 2024-01-12; 修回日期: 2024-02-02。

基金项目: 国家自然科学基金(62001452); 中国福建光电信息科学与技术创新实验室(闽都创新实验室)(2021ZZ116); 福州市科技计划项目(2022-ZD-001)。

作者简介: 沈泽鑫(1995-), 男, 硕士。

通讯作者: 李俊(1979-), 男, 博士, 研究员。

引用格式: 沈泽鑫, 宋科夫, 张琳琳, 等. 基于多特征融合图像分割的焊缝检测焊接系统[J]. 计算机测量与控制, 2024, 32(7): 77-84.

green blue) 图像进行处理的许多方法在处理复杂焊缝形状和不同焊接环境下的适应性有待提高^[6]; 基于神经网络的深度学习算法由于复杂的模型结构, 导致计算复杂度高和迁移性差的问题^[7], 无法满足工业应用的实时性和灵活性需求; 再次, 光线条件不佳或存在粉尘遮挡时, 检测精度会明显下降^[8]。随着激光深度相机性能提高, 利用其获取的深度图像能消除光线、粉尘干扰, 避免图像畸变。但在焊缝检测中, 由于工件表面不均匀, 导致深度图像中的噪声和焊缝边界模糊, 影响检测精度。对采集的深度图像进行预处理是针对该问题的解决方案, 目前主要的图像预处理方法有双边滤波^[9]、均值滤波^[10]和高斯滤波^[11]等。均值滤波在处理后容易丢失图像细节^[12], 增加误检。双边滤波虽然可以去噪, 但可能导致边缘模糊^[13], 进一步影响焊缝的准确检测。在图像分割上, 自适应阈值方法^[14]可以区分不同灰度级的目标和背景, 但在复杂情况下效果不佳^[15]。从图 1 所示的铁板工件表面深度图像直方图中可以得到明显的双峰特征, 固定阈值法^[16]便是针对图像直方图上出现两个峰值所提出的分割方法。但直方图左侧依然具有许多噪点, 且双峰的阈值不一, 这是由于工件表面纹理不平滑和凹槽处高度不均所导致的, 无法使用鲁棒性过低的固定阈值法进行分割。

同时, 在控制机械臂进行焊接的过程中, 由于焊接工件并不全是平面, 会存在表面凸起的工件形状, 此时焊枪无法从垂直方面对焊缝进行焊接操作, 并且在运动控制时也需要避免焊枪因坐标错误、阻挡等情况撞击工件, 因此在进行焊接控制的过程中需要考虑到避障检测的问题。

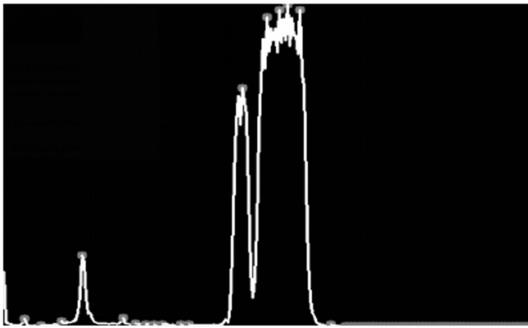


图 1 铁板工件表面深度图像直方图

本文针对上述问题开展研究。首先, 针对图像边缘模糊问题提出基于边缘保护机制的双边滤波图像处理算法; 针对阈值分割算法在处理含复杂目标和背景的图像时难以分割的问题, 采用了自适应阈值法^[17]结合颜色、纹理和形状等多种特征, 提出基于多特征融合与斜矩包络线拟合的分割方法。其次, 深入研究了手眼标定算法的相关理论和实验步骤, 并结合机器人进行实时焊接检测系统的路径规划, 详细阐述了基于定向包围盒 (OBB, oriented bounding box) 包围盒的避障检测算法的实现与仿真。最后, 通过实验验证了本研究提出的焊缝检测焊接系统在使用深度图像进行焊缝检测中的有效性和先进性, 并控制机械臂进行焊接测试。

1 系统流程

针对传统焊缝检测和焊接操作过程当中存在的环境干扰、实时性低且工件表面平整度不一导致检测精度低的问题, 提出了一种基于多特征融合与斜矩包络线拟合的图像分割算法的自动化焊缝检测焊接系统, 系统流程图如图 2 所示。该系统包括激光深度相机、机械臂和焊枪等硬件设备的集成, 通过协同工作实现焊缝的自动化检测、焊接碰撞检测和焊接精度测试。

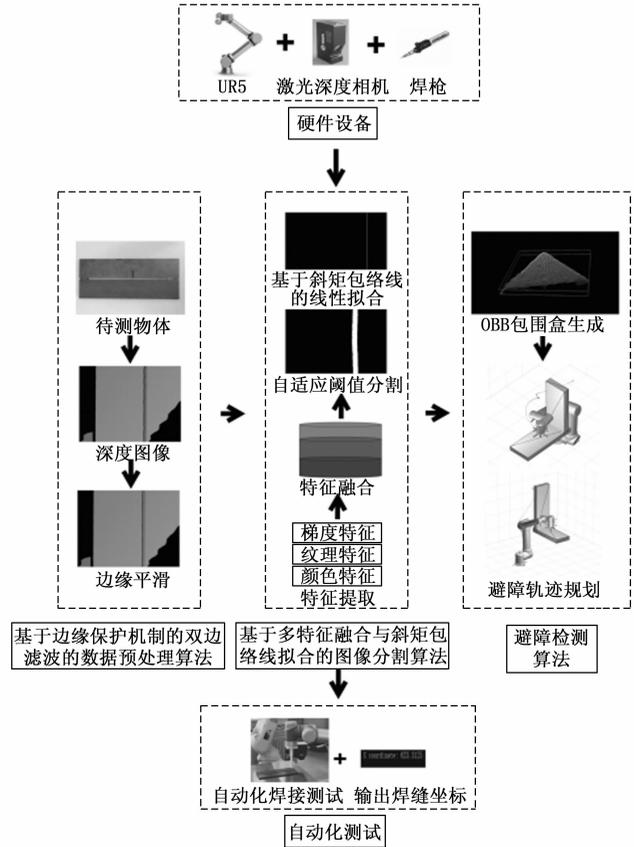


图 2 系统流程图

首先, 将激光深度相机设置在机械臂末端对待测物体进行激光扫描, 采集其深度图像并使用基于边缘保护机制的双边滤波图像处理算法对获取的深度图像进行预处理; 接着, 将预处理后的深度图像通过基于多特征融合的图像分割算法对深度图像进行分割处理后, 采用基于斜矩包络线的方法对焊缝进行线性拟合以获得焊缝的像素坐标; 最后, 采用手眼标定算法, 将焊缝在深度图像中的位置映射到现实坐标系中, 以得到焊缝的位置坐标和实际宽度。同时, 预设机械臂的焊接姿态, 结合焊缝位置规划机械臂移动轨迹, 使用基于 OBB 包围盒的避障检测算法检测机械臂末端的焊枪在焊接过程中是否会与工件产生碰撞, 以便通过机械臂末端的焊枪对焊缝进行焊接测试。

2 焊缝检测

2.1 基于边缘保护机制的双边滤波图像预处理

边缘保护机制在改进的双边滤波算法中的功能是保持

图像的边缘细节和纹理信息, 避免因滤波而导致边缘模糊, 该机制通过限制邻域内与中心像素较接近的像素参与滤波, 保持边缘的清晰度。其原理与计算过程基于以下几个方面: 首先是对滤波进行边缘权重的限制, 在传统的双边滤波中, 局部邻域内的像素都会参与滤波计算, 无论其与中心像素之间的差异有多大。在边缘保护机制中, 引入边缘权重限制, 通过自适应阈值来判断是否参与滤波。当邻域内的像素与中心像素的差异小于自适应阈值时, 才允许其参与滤波。以保留边缘的细节和纹理信息, 避免边缘的过度平滑从而导致模糊。其次, 为了实现边缘权重的限制, 需要计算中心像素与邻域像素之间的差异。本文方法通过综合欧氏距离与颜色差异的范数进行中心像素与邻域像素之间的差异计算, 如公式所示:

$$D_d = \sqrt{(d_{sp} * d_{sp}) + (d_{co} * d_{co})} \quad (1)$$

其中: D_d 表示差异, d_{sp} 表示中心像素与邻域像素的空间域差异, d_{co} 表示中心像素与邻域像素的颜色域差异。通过计算获得的差异值加入边缘权重 W_{wr} 的计算公式当中进行滤波的权重限制计算, 其中 θ_{sp} 和 θ_{co} 分别为空间域和颜色域的标准差。

$$W_{wr} = e^{-(D_d)^2 / 2 * (\theta_{sp}^2) - (D_c)^2 / 2 * (\theta_{co}^2)} \quad (2)$$

此处采用差异值的平方作为权重公式中的差异值, 使其与原始的差异公式保持一致以充分考虑中心像素与邻域像素在空间位置和颜色上的差异, 并在计算权重时综合这些差异信息, 根据权重值来判断是否应用滤波, 以保留更多的细节和纹理信息, 避免边缘模糊的问题。

最后, 根据权重值来判断是否应用滤波, 只有权重大于零的邻域像素才会参与滤波计算, 以此保留更多的边缘细节和纹理信息, 避免边缘模糊的问题。

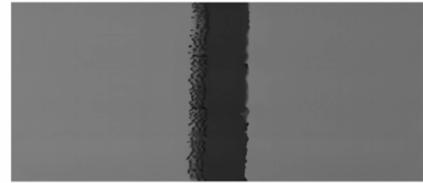
如图 3 (a) 为原始获得的深度图像细节图, 图 3 (b) 为双边滤波后深度图像在焊缝处的细节图, 图 3 (c) 则为基于边缘保护机制的双边滤波后的深度图像细节图。从图中可以看到经过基于边缘保护机制的双边滤波后的深度图像中焊缝的边缘更加清晰和平滑, 有助于后续的图像分割处理和更准确地进行焊缝检测工作。

2.2 基于多特征融合与斜距包络线拟合的图像分割方法

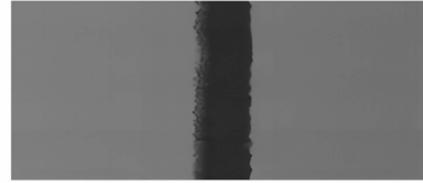
在特征融合部分, 首先通过索伯 (Sobel) 算子^[18]进行梯度幅值特征的计算, 提取梯度特征, 其中梯度描述的是二维图像中像素值的变化率, 可以作为图像边缘和轮廓信息的参考。其计算方式为: 假设输入图像为 $l(x, y)$, Sobel 算子通常包含两个卷积核 (G_x, G_y), 一个用于水平方向的梯度计算, 一个用于垂直方向的梯度计算, 大小为 3×3 。根据水平和垂直方向的梯度值, 计算梯度幅值 $G_g(x, y)$:

$$G_g(x, y) = \sqrt{G_x^2 + G_y^2} \quad (3)$$

同时通过定向快速旋转筒报 (ORB) 算法^[19]提取局部二值 (LBP) 特征以获取图像的纹理特征 $L_{bp}(x, y)$, 并将图像转换到色相、饱和度、明度 (HSV, hue, saturation, value) 颜色空间^[20]提取颜色特征 $C_{co}(x, y)$ 。



(a) 原始深度图像



(b) 双边滤波后的深度图像



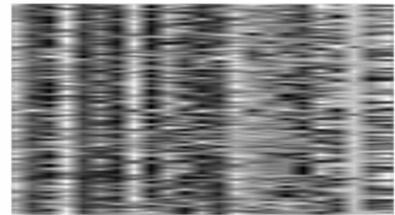
(c) 基于边缘保护机制双边滤波对比图

图 3 基于边缘保护机制双边滤波对比图

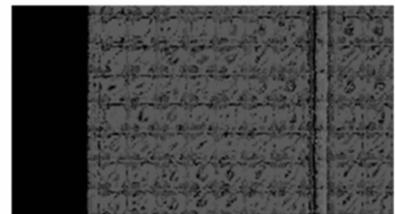
最后, 将梯度幅值特征、纹理特征和颜色通道特征合并为一个多通道图像 $M(x, y)$, 其中每个通道包含一个特征:

$$M(x, y) [G_g(x, y) \quad L_{bp}(x, y) \quad C_{co}(x, y)] \quad (4)$$

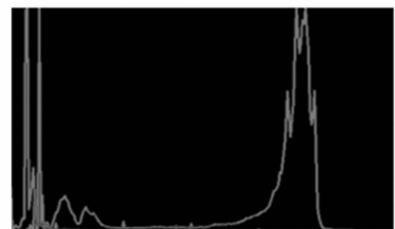
如图 4 (a)、4 (b) 和 4 (c) 为 3 个通道的特征图。



(a) 梯度特征图



(b) 纹理特征图



(c) 颜色特征图

图 4 三通道特征图

在图像分割方面, 通过设定自适应阈值进行深度图像

分割的方法，逐一对深度图像中的像素点的灰度值与自适应阈值进行比较，高于阈值的点设置为白色，低于阈值的点设置为黑色，则可将深度图像转换为以灰度值进行区分的二值化图像，如图 5 所示。其二值化图像计算公式^[21]为：

$$\begin{cases} H(x,y) = \begin{cases} 1, f(x,y) > T \\ 0, f(x,y) \leq T \end{cases} \\ T = \text{mean}(x,y) \end{cases} \quad (5)$$

其中： $H(x, y)$ 表示经过阈值法处理后的深度图像中的像素点 (x, y) 的灰度值， $f(x, y)$ 则表示处理前的灰度值， $\text{mean}(x, y)$ 为像素点 (x, y) 在领域内的像素平均值。

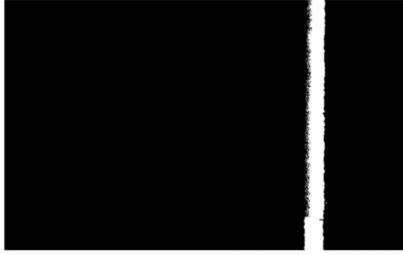


图 5 特征融合后自适应阈值分割图

然而，分割后的焊缝边缘依然存在着锯齿状噪声和凸包，不利于机械臂进行线性运动开展焊接工作。针对这一问题，本研究采用基于斜矩包络线的方法进一步将焊缝拟合合成一条可视化的直线。

其计算过程为：首先对二值化图像进行轮廓检测，生成斜矩包络框，以准确表示目标的位置和形状。这可以通过在图像上绘制矩形边界框或使用斜矩形的 4 个角点来完成，如图 6 (a) 所示。接着将斜矩包络框根据其质心坐标拟合合成一条完整的直线，如图 6 (b) 所示为线性拟合结果图，即为斜矩包络线拟合结果。其质心 (x_c, y_c) 计算公式为：

$$\begin{cases} x_c = \frac{1}{n} \sum_{n=1}^n x_i \\ y_c = \frac{1}{n} \sum_{n=1}^n y_i \end{cases} \quad (6)$$

其中： (x_i, y_i) 为轮廓上的点坐标， n 为轮廓上的点数。

2.3 自动化焊缝检测

由上节所述的图像分割算法得到的基于斜矩包络线的线性拟合图像，可以定位焊缝在图像中的具体位置，并通过二值化图像来判断焊缝的宽度大小，定位方法为：首先遍历图像中的每一个红色像素点 (x_{red}, y_{red}) ，通过这些坐标就可以确定焊缝在图像中的具体坐标。其次，获得焊缝的图像坐标以后，可以通过手眼标定算法得到焊缝相对于基坐标系的坐标。此外，通过焊缝的像素坐标宽度亦可以采用手眼标定算法测量出焊缝的实际宽度，以便于增加后续焊接工作的准确性。

通过这个流程获得的坐标即可以操作机械臂末端的焊枪前往焊缝处进行线性焊接工作。

3 手眼标定算法

系统采用眼在手上^[22]的手眼视觉系统^[23]，机械臂末端带动相机移动以满足工业零件表面的扫描需求。如图 7 所



(a)斜矩包络线计算结果图



(b)基于斜矩包络线进行线性拟合结果图

图 6 斜矩包络线计算结果

示为机械臂简图。

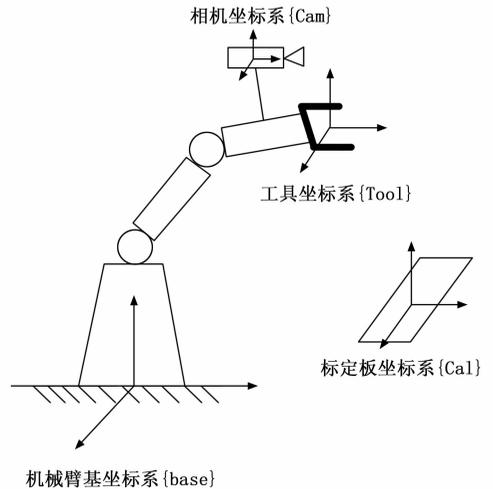


图 7 视觉系统坐标图

标定板坐标系 $\{Cam\}$ 和基坐标系 $\{Base\}$ 的转换关系是固定的，将机械臂进行两次的任意姿态移动并进行记录，根据这一关系计算出工具坐标系和相机坐标系的转换矩阵 $T_{(Cam)}^{(Tool)}$ ，其中 $P_{(Tool)}$ 、 $Q_{(Tool)}$ 和 $P_{(Cam)}$ 、 $Q_{(Cam)}$ 为任意两个点在工具坐标系和相机坐标系下的坐标：

$$\begin{cases} P_{(Tool)} = T_{(Cam)}^{(Tool)} P_{(Cam)} \\ Q_{(Tool)} = T_{(Cam)}^{(Tool)} Q_{(Cam)} \end{cases} \quad (7)$$

通过求得的 $T_{(Cam)}^{(Tool)}$ ，根据公式 8 能够推导出 $T_{(Cam)}^{(Base)}$ ：

$$P_{(Base)} = T_{(Cam)}^{(Base)} T_{(Cam)}^{(Tool)-1} P_{(Tool)} \quad (8)$$

其中， $P_{(Base)}$ 为任意点 P 在基坐标系下的坐标。

4 机械臂运动控制策略

4.1 基于解析法的六轴机械臂的逆运动学计算

在工业机器人的逆运动学计算中，主要采用的方法有 3

种, 即几何法、解析法和数值法, 数值法虽然具有适用性好的优点, 但其速度慢和数值稳定性差的缺点^[24]不适用于本文系统所需, 对于通常处于特定工作环境的扫描和焊接工业机器人而言, 为了满足一定的工作性能, 通常采用解析法^[25]进行逆运动学求解, 因此本文采用解析法进行机械臂的逆运动学求解。

设机械臂末端位姿为 $[x, y, z, u, v, w]$, 且在运动过程中 z, u, v, w 保持不变, x, y 满足线性关系。因此可以得出逆运动学公式进行解析解的求解步骤如下: 首先因为姿态 $[u, v, w]$ 固定, 因此可以通过已知的 u, v, w 求解得到与基坐标系的旋转矩阵 T_6^0 :

$$\begin{bmatrix} \cos w \cos v & \cos w \sin v \sin u - \sin w \cos u & \cos w \sin v \sin u + \sin w \sin u \\ \cos w \cos v & \sin w \sin v \sin u + \cos w \cos u & \sin w \sin v \cos u - \cos w \sin u \\ -\sin w & \cos v \sin u & \cos v \cos u \end{bmatrix} \quad (9)$$

同理可求出连杆 i 相对于连杆 $i-1$ 之间的位姿转换矩阵关系 A_i , 如公式所示:

$$T_6^0 = A_1 A_2 A_3 A_4 A_5 A_6 \quad (10)$$

其中转换矩阵 A_i 的表达式为:

$$\begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i \cos \alpha_i & \sin \theta_i \sin \alpha_i & \alpha_i \cos \theta_i \\ \sin \theta_i & \cos \theta_i \cos \alpha_i & -\cos \theta_i \sin \alpha_i & 0 \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

α_i 与 d_i 在 UR5 机械臂的 D-H 参数表^[26]中获得, 如表 1 所示。

表 1 UR5 机械臂 D-H 参数表

连杆	θ_i/rad	α_i/rad	a_i/m	d_i/m
1	θ_1	$\pi/2$	0	0.089
2	θ_2	0	0.425	0
3	$\theta_{\text{轴}3}$	0	-0.392	0
4	$\theta_{\text{轴}4}$	$\pi/2$	0	0.109
5	$\theta_{\text{轴}5}$	$-\pi/2$	0	0.095
6	θ_6	0	0	0.082

由此便可求得机械臂的各个关节角的运动角度变量 θ_i 。

4.2 基于 OBB 的避障检查

本研究采用了一种基于 OBB 的避障检查策略, 该策略通过有效地描述和检测障碍物, 提高了机器人导航的性能。OBB^[27]是一个旋转的矩形包围盒, 与障碍物的几何形状更贴近, 相对于传统的轴对齐包围盒 (AABB, axis-aligned bounding box)^[28]更精确。

首先使用主成分分析方法生成目标工件的 3 个主方向, 获取质心点并计算出协方差矩阵 $\boldsymbol{\varepsilon}$, 如式 (12) 所示:

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \begin{bmatrix} \text{cov}(x, x) & \text{cov}(x, y) & \text{cov}(x, z) \\ \text{cov}(y, x) & \text{cov}(y, y) & \text{cov}(y, z) \\ \text{cov}(z, x) & \text{cov}(z, y) & \text{cov}(z, z) \end{bmatrix} \quad (12)$$

根据协方差矩阵分解得出目标工件点云的主方向。接着利用计算得出的主方向和工件质心, 生成一个包围盒,

如图 8 所示。

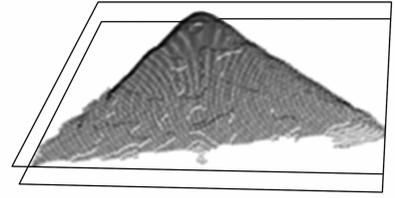
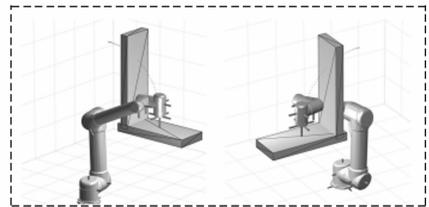


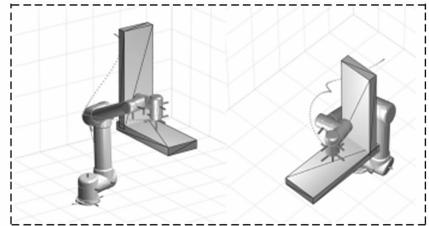
图 8 三角形工件的 OBB 包围盒示意图

在进行碰撞检测之前, 需要先采用梯形速度轮廓的轨迹规划方法^[29]生成机械臂的移动轨迹, 然后利用机械臂逆运动学计算各关节的角度以确定空间位姿, 再基于 OBB 包围盒方法判断机械臂与工件是否发生碰撞, 如果检测到碰撞发生, 则重新生成一条路径轨迹再进行碰撞检测。如图 9 为避障检测前后的机械臂移动仿真示意图, 虚线段为机械臂末端执行器 (焊枪) 的移动轨迹。

从图 9 (a) 中可以看出, 未进行避障检测时, 机械臂的移动轨迹会与工件发生碰撞, 而如图 9 (b) 所示为经过避障检测算法验证后的路径仿真示意图, 机械臂可以规避障碍进行移动和焊接工作。



(a) 未轨迹规划仿真图



(b) 轨迹规划后仿真图

图 9 避障检测轨迹规划前后仿真图

5 实验结果与分析

5.1 实验平台搭建

系统包括工控机作为上位机控制器, 处理激光深度相机的数据并获取焊缝坐标, 提供人机交互界面。UR5 控制箱作为下位机, 负责机器人的运动控制和焊枪开关。工控机与相机使用 Tcp/Ip 通信, 与机器人控制器则通过 Socket 通信。系统架构详见图 10。

为了测试系统有效性, 搭建了如图 11 的实验平台。

5.2 焊缝检测误差对比实验

本实验通过对齿轮、钢板和铁片 3 种工件进行表面焊缝检测, 如图 12 为该焊缝检测中扫描工作图。

对每种工件扫描 100 张深度图像, 进行焊缝检测, 并

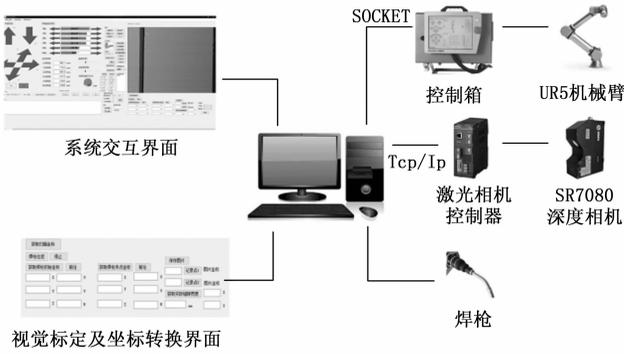


图 10 系统架构图

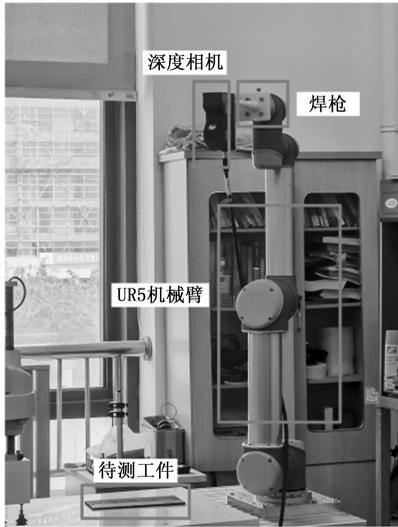


图 11 系统布局图



图 12 扫描工作示意图

记录平均误差。此误差为实际焊缝中点与检测定位的像素坐标间的欧氏距离之差，单位毫米 (mm)。通过与其他分割方法对比，验证焊缝检测的有效性和先进性。

如表 2 所示，本文方法误差在 3 种工件的焊缝检测中，误差均低于经典的传统分割算法以及经典的神经网络分割算法，且误差均稳定在 0.5 mm 以内。

表 2 焊缝检测误差对比实验

工件	C 均值 ^[30]	U-Net ^[31]	本文方法
钢板	0.95 mm	0.67 mm	0.24 mm
齿轮	0.86 mm	0.46 mm	0.39 mm
铁片	0.52 mm	0.63 mm	0.39 mm

5.3 焊缝宽度检测实验

实验使用三块带有不同粗细的焊缝的铁片作为实验对象，通过对钢板表面设置 5 个点进行宽度检测，将检测宽度与实际宽度的欧式距离作为误差值，如图 13~15 为设定的三组铁片的一共 20 个点，并进行编号。

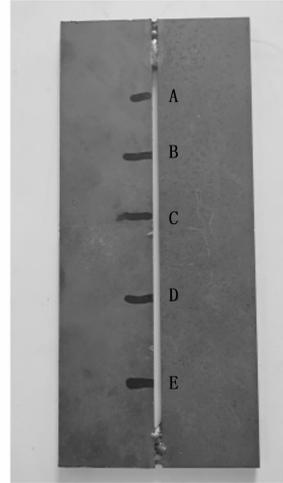


图 13 焊缝宽度检测实验铁片第一组样本图

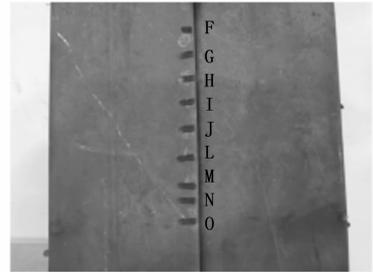


图 14 焊缝宽度检测实验铁片第二组样本图

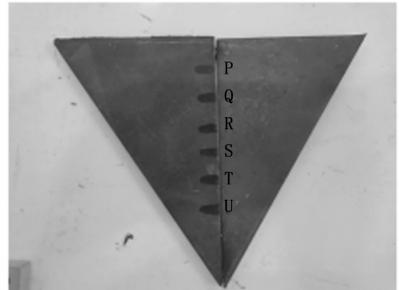


图 15 焊缝宽度检测实验铁片第三组样本图

实验结果如表 3 所示，本实验的允许误差范围为 0.5 mm，而计算出的平均误差值为 0.302 9 mm。可见检测结果均在允许误差范围内。

表 3 焊缝宽度检测误差实验

编号	实际宽度/mm	本文方法/mm	误差值/mm
A	3.05	2.72	0.33
B	2.98	2.84	0.14
C	3.20	2.88	0.32
D	3.20	2.88	0.32
E	3.43	2.98	0.45
F	2.11	2.34	0.23
G	2.06	2.37	0.21
H	2.14	2.26	0.12
I	2.11	2.50	0.39
J	2.08	2.33	0.25
K	2.10	2.49	0.29
L	2.12	2.57	0.45
M	1.99	2.28	0.29
N	2.07	2.25	0.18
O	1.98	2.31	0.33
P	1.52	1.99	0.47
Q	2.02	2.15	0.13
R	1.76	2.03	0.27
S	1.94	2.39	0.45
T	1.77	2.25	0.48
U	1.83	2.09	0.26

同时, 对比不同的图像分割算法所测量的焊缝宽度误差值, 如表 4 所示为不同图像分割算法的焊缝宽度检测误差实验结果, 其平均误差值分别为: 0.369 5 mm、0.311 9 mm 和 0.418 mm, 均高于本文方法所得平均误差值, 由此可得本文方法在焊缝宽度检测精度方面有所提升。

表 4 焊缝宽度检测误差对比实验

编号	C 均值/mm	U-Net/mm	区域生长 ^[32] /mm
A	0.56	0.35	0.45
B	0.39	0.42	0.34
C	0.22	0.39	0.61
D	0.24	0.47	1.20
E	0.35	0.46	0.50
F	0.69	0.40	0.44
G	0.72	0.29	0.25
H	0.18	0.12	0.23
I	0.92	0.62	0.46
J	0.03	0.33	0.17
K	0.11	0.09	0.26
L	0.24	0.05	0.22
M	0.21	0.50	0.36
N	0.16	0.32	0.33
O	0.11	0.35	0.13
P	0.82	0.33	0.77
Q	0.26	0.14	0.63
R	0.42	0.18	0.29
S	0.48	0.28	0.32
T	0.36	0.31	0.48
U	0.29	0.15	0.34

5.4 焊缝检测定位误差实验

由于焊缝焊接时的准确性取决于焊点定位的准确性, 因此本文同样以图 13—图 15 中的三组样本铁片作为实验对象, 进行焊点定位实验, 以验证本系统焊点定位的准确性。

如表 5 所示, 实验可得本系统的平均定位精度为 0.339 3 mm, 远远小于允许误差 0.5 mm。

表 5 焊点定位误差实验

编号	实际坐标/pixel	本文方法/pixel	定位误差/mm
A	546,72	546,65	0.160
B	550,168	549,174	0.139
C	545,365	546,313	1.19
D	547,462	547,453	0.207
E	546,513	547,532	0.437
F	304,39	307,61	0.510
G	302,76	302,60	0.368
H	307,110	307,88	0.506
I	308,145	308,128	0.391
J	310,186	311,168	0.414
K	310,227	311,236	0.207
L	309,272	311,254	0.414
M	312,293	313,300	0.161
N	313,324	313,334	0.230
O	315, 318	315,335	0.322
P	318, 93	321, 94	0.069
Q	321, 131	318,140	0.212
R	324, 174	323,205	0.713
S	325, 207	328,218	0.255
T	327, 243	324,245	0.083
U	329, 289	329,283	0.138

如表 6 所示为不同焊点定位算法的误差对比实验结果。算法 1 为直觉模糊 C 均值和 Canny 算子相结合的方法进行焊点定位^[33], 其平均误差为 0.375 4 mm, 算法 2 为基于阈值分割与感兴趣区域提取的方法^[34], 其平均误差为 0.386 2 mm, 均高于本文方法的平均误差值。

表 6 焊点定位误差对比实验

	本文方法	算法 1 ^[33]	算法 2 ^[34]
平均误差	0.339 3 mm	0.375 4 mm	0.386 2 mm

6 结束语

本文介绍了一种结合基于多特征融合与自适应阈值的图像分割算法和激光深度相机的焊缝检测方法, 开发了一套融合计算机视觉和机械臂控制的焊缝检测焊接系统。该焊缝检测焊接系统具备适应环境干扰、实时性和高精度稳定性的优势, 能够高效地检测焊缝位置并进行焊接操作。同时, 在焊接过程中进行机械臂的避障检测, 以提高焊接工序的质量、安全性和生产效率。实验结果表明, 该系统焊缝检测精度高, 能够规划焊接路径以避免碰撞, 在零件缝隙检测、工件表面维修焊接等领域具有广泛应用前景。

然而,该方法还存在进一步改进的潜力。如采用多尺度的缝隙检测技术,结合 RGB 图像进行分析,以提高检测的精度,同时可以考虑引入基于机器学习的分割算法,以提高分割算法的泛化能力和自适应性。此外,未来还可以探索更广泛的应用领域,并与其他智能制造技术进行集成,以推动制造业的自动化和智能化发展。

参考文献:

- [1] 佟彤,蔡艳,孙大为,等. 基于有监督过渡区的焊缝 X 射线图像分割 [J]. 焊接学报, 2014, 35 (3): 101-104.
- [2] 王璇. 焊接机器人焊缝信息视觉检测系统研究 [D]. 天津: 河北工业大学, 2014.
- [3] 杨明,刘露,郭榛榛. 机器视觉在船舶焊缝图像缺陷分割检测中的应用 [J]. 舰船科学技术, 2021, 43 (18): 217-219.
- [4] 孙志刚,赵毅,刘传水,等. 基于深度学习的金属焊接管道内壁缺陷检测方法研究 [J]. 焊管, 2020, 43 (7): 1-7.
- [5] 唐溪,姚锡凡,董艺,等. 基于改进 CenterNet 的焊缝起始向量检测与机器人位姿估计方法 [J]. 计算机集成制造系统, 2022, 28 (9): 16.
- [6] 周思羽. 基于深度学习的焊缝识别及轨迹规划控制方法研究 [D]. 长春: 长春工业大学, 2023: 2.
- [7] 段晨阳,江鹏,韩震,等. 基于深度学习的水声信道均衡技术研究 [J]. 舰船科学技术, 2022, 44 (23): 123-127.
- [8] 袁海亮,薛强,王海玲,等. 基于工业机器人与机器视觉的红外传感器装配系统设计 [J]. 制造技术与机床, 2023 (6): 33-38.
- [9] 靳明,宋建中. 一种自适应的图像双边滤波方法 [J]. 光电工程, 2004, 31 (7): 5.
- [10] 崔建伟,王冬青,刘金燕. 基于均值滤波和小波变换的单幅图像去雾算法 [J]. 计算机与数字工程, 2022, 50 (6): 1339-1342.
- [11] 李健,丁小奇,陈光,等. 基于改进高斯滤波算法的叶片图像去噪方法 [J]. 南方农业学报, 2019, 50 (6): 1385-1391.
- [12] 李秀峰,苏兰海,荣慧芳,等. 改进均值滤波算法及应用研究 [J]. 微计算机信息, 2008 (1): 235-236.
- [13] 王镭. 双边滤波中关键技术研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2018.
- [14] 胡永生,冀小平. 基于阈值的图像分割方法的研究 [J]. 科技情报开发与经济, 2007 (2): 171-172.
- [15] 卞红雨,沈郑燕,张志刚,等. 基于雁群优化的声呐图像快速阈值分割方法 [J]. 声学及电子工程, 2011 (3): 1-3.
- [16] 张日升,原明亭,丁军航,等. 基于图像阈值分割的浒苔图像提取 [J]. 自动化技术与应用, 2020, 39 (2): 83-86.
- [17] 王慧华,杨小刚. 自适应阈值法的红外图像边缘检测研究 [J]. 激光杂志, 2022, 43 (11): 5.
- [18] 李洁,袁知博,秦嘉悦. 基于 Sobel 算子边缘检测的太阳电池缺陷特征提取方法 [J]. 太阳能学报, 2021, 42 (1): 6.
- [19] 卫文乐,谭力宁,芦利斌,等. 融合描述子的 ORB-LBP 特征匹配算法 [J]. 电光与控制, 2020, 27 (6): 7.
- [20] 王红雨,尹午荣,汪梁,等. 基于 HSV 颜色空间的快速边缘提取算法 [J]. 上海交通大学学报, 2019, 53 (7): 8.
- [21] 孙国栋,徐昀,徐亮,等. 不均匀光照和重影的仪表图像二值化方法 [J]. 应用光学, 2020, 41 (1): 74-78.
- [22] 张妍. 工业机器人手眼标定精度分析研究 [D]. 扬州: 扬州大学, 2019.
- [23] 王君臣,王田苗,杨艳,等. 非线性最优机器人手眼标定 [J]. 西安交通大学学报, 2011, 45 (9): 15-20.
- [24] 张栩曼,张中哲,王燕波,等. 基于空间六自由度机械臂的逆运动学数值解法 [J]. 导弹与航天运载技术, 2016, (3): 81-84.
- [25] GAN J Q, OYAMA E, ROSALES E M, et al. A complete analytical solution to the inverse kinematics of the Pioneer 2 robotic arm [J]. Robotica, 2005, 23 (1): 123-129.
- [26] GAEID K S, NASHEE A F, AHMED I A, et al. Robot control and kinematic analysis with 6DoF manipulator using direct kinematic method [J]. Bulletin of Electrical Engineering and Informatics, 2021, 10 (1): 70-78.
- [27] DING, JING X. Research on collision detection algorithm based on OBB [J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 433-435: 936-939.
- [28] CAI P, INDHUMATHI C, CAI Y, et al. Collision detection using axis aligned bounding boxes [J]. Simulations, Serious Games and Their Applications, 2014: 1-14.
- [29] CHEN G, LIU D, WANG Y, et al. Path planning method with obstacle avoidance for manipulators in dynamic environment [J]. International Journal of Advanced Robotic Systems, 2018, 15 (6): 172988141882022-172988141882022.
- [30] CHEN S, ZHANG D. Robust image segmentation using FCM with spatial constraints based on new kernel-induced distance measure [J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics), 2004, 34 (4): 1907-1916.
- [31] RONNEBERGER O, FISCHER P, BROX T. U-Net: convolutional networks for biomedical image segmentation [C] // Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention (MICCAI), October 5-9, 2015: 234-241.
- [32] 赵国鑫,闫旺,于灏. 基于视觉技术的风电塔筒焊缝宽度检测系统设计 [J]. 电脑知识与技术, 2023, 19 (19): 52-55.
- [33] 晁涌,郁梅,王一刚,等. 基于聚类和特征检测的焊缝和钨针定位方法 [J]. 激光杂志, 2020, 41 (2): 38-44.
- [34] 杨书娟,蒋毅,俞建峰,等. 激光视觉引导的管道焊缝识别与跟踪系统 [J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59 (16): 245-253.