

基于图像识别的 AH36 钢激光焊缝 节点定位技术研究

洪祥¹, 张海越², 宋骥³

(1. 南京大全电气研究院有限公司, 南京 211000; 2. 伊利诺伊大学 厄巴纳-香槟分校, 美国伊利诺伊州 尚佩恩 61820; 3. 中国科学技术大学 信息与智能学部, 合肥 230000)

摘要: 激光焊接过程中, 强光导致焊接节点的视觉图像质量较低, 降低了定位准确性; 为了优化特殊材质的激光焊接节点定位精度; 以 AH36 钢为例, 设计一种激光焊接节点视觉定位方法; 在获取 AH36 钢的激光焊接节点区域图像后, 通过 EGDNet 算法获取焊接节点边缘图像; 利用 Shi-Tomasi 算法检测焊接边缘图像的点, 计算节点在 AH36 钢激光焊接图像中的位置坐标, 完成 AH36 钢激光焊接节点定位; 实验结果表明, 该方法的焊接节点采集质量高; 对 x , y , z 三个方向上的定位误差低于 0.2 mm; 最大定位时间为 0.75 s; 对于不同方案的平均定位误差始终较小, 低于 0.5 mm; 在基准实验环境下的定位误差平均值为 0.2 mm, 标准差为 0.05 mm, 光照变化时的平均值为 0.35 mm, 标准差为 0.08 mm, 杂质引入时的平均值为 0.4 mm, 标准差为 0.1 mm; 证明了所提技术具有较高的定位精度和定位速度。

关键词: 图像识别; 激光焊接; 图像去噪; AH36 钢; 节点定位; Shi-Tomasi 算法

Research on AH36 Steel Laser Welding Joint Location Technology Based on Image Recognition

HONG Xiang¹, ZHANG Haiyue², SONG Qi³

(1. Nanjing Daqo Electric Research Institute Co., Ltd., Nanjing 211000, China;

2. Urbana Champaign Branch School University of Illinois, Champaign, IL, USA 61820;

3. Department of Information and Intelligence, University of Science and Technology of China, Hefei 230000, China)

Abstract: In the process of laser welding, strong light causes the low quality of visual images at welding nodes, which reduces positioning accuracy. To optimize the positioning accuracy of laser welding nodes with special materials. Taking AH36 steel as an example, a visual positioning method for laser welding nodes is designed. After obtaining the laser welding node area image of AH36 steel, the edge image of welding nodes is obtained through EGDNet algorithm. The Shi-Tomasi algorithm is used to detect the corners of welding edge image, calculate the position coordinates of the nodes in the laser welding image of AH36 steel, and complete the node positioning of AH36 steel laser welding. The experimental results show that the welding node acquisition quality of this method is high; The positioning errors of x , y , and z directions are less than 0.2 mm; The maximum positioning time is 0.75 s; The average positioning error for different schemes is always small, below 0.5 mm; The average positioning error in the benchmark experimental environment is 0.2 mm, with a standard deviation of 0.05 mm. The average value is 0.35 mm when the light changes, with a standard deviation of 0.08 mm. The average value are introduced is 0.4 mm when impurities, with a standard deviation of 0.1 mm. It is proven that the proposed technology has high positioning accuracy and speed.

Keywords: image recognition; laser welding; image denoising; AH36 steel; node positioning; Shi-Tomasi algorithm

0 引言

AH36 钢具有冲击性能好、强度高和刚度高等优点^[1]。激光焊在焊接过程中, 通过激光束轰击焊接件, 在精密件和小件中具有焊接精度高的优点, 两者在智能制造领域都得到了广泛的应用。激光焊与智能视觉控制密不可分, 因

此, 在实际应用中可将其分为手动、自动以及震动式等不同类型。除此之外, 激光焊与智能视觉的结合, 在安全性方面也具有一定的保障, 这是由于激光焊不仅能够利用切换装置将激光束切换至不同的工作站, 还能结合智能视觉的反馈结果, 利用 X 射线防护措施保证整个焊接流程的安全^[2], 但随着高端制造业的发展, 激光焊技术在应用过程

收稿日期: 2023-06-20; 修回日期: 2023-07-17。

基金项目: 国家工信部智能船舶项目(CBG4N21-4-2)。

作者简介: 洪祥(1988-), 男, 硕士, 高级工程师。

宋骥(1990-), 男, 博士, 中国科学院技术大学特任教授, 博士生导师。

引用格式: 洪祥, 张海越, 宋骥. 基于图像识别的 AH36 钢激光焊缝节点定位技术研究[J]. 计算机测量与控制, 2023, 31(11): 299-305, 314.

中需要高精度的焊接件节点视觉定位，因此研究激光焊接节点定位的智能视觉方法，具有重要意义。相关学者也提出了一些较好的方法，但是在一些特殊材料的定位过程中，还存在明显缺陷：

刘星武^[3]等利用水平集分割处理焊接图像，将连通域引入面积排序过程中，初步定位焊接节点，通过两次排序方法在粗定位的基础上完成焊接节点定位，该方法获取的焊接图像中存在高斯噪声，不利用后续节点定位，存在图像采集质量差的问题。石端虎^[4]等首先对焊接图像展开分割处理，其次根据自动对应准则采用投影距离提取算法获取焊接节点的位置数据，分析空间中焊接节点的分布特征，以此为依据完成节点定位，该方法在 x 和 y 方向中的定位结果存在误差，且定位所需的时间较长，存在定位精度低和定位效率低的问题。朱文杰^[5]等提出了一种基于双目视觉引导机器人的焊点定位方法。该方法在机器人末端安装双目传感器以获取焊点初步定位结果，并将其作为构建的焊点定位误差补偿模型输入，通过训练输出补偿结果，实现了焊点定位。王聪毅^[6]等同时获取了碳钢板激光焊后出现的十字裂纹，并通过磁场对其进行多角度励磁。利用激光成像传感器采集励磁后的焊接缺陷图像，获取了交叉焊缝缺陷特征。上述两种方法实现了焊点和焊缝的定位，但是由于传感器采集角度的不同，导致其定位精度存在一定的局限，因此上述两种方法存在定位精度低的问题。梁国安^[7]等在利用相控阵检测法获取角焊缝缺陷数据的基础上，通过结合小波去噪及经验模态两种方法，实现缺陷信号重构。该方法为本文去除信号噪声提供了很好的借鉴。

激光焊接^[8-9]过程中会产生高温和强光，这可能对视觉系统造成干扰。高温可能引起镜头或传感器的热膨胀，影响图像质量，导致图像中存在过多的噪声。同时，强光可能使得传感器无法正确捕捉焊接节点的细节，导致视觉定位的困难。在焊接过程中，准确地定位焊缝节点非常重要，节点位置的不准确将导致焊接质量下降。为此，本文以 AH36 钢为例，从以下三个方面设计了一种激光焊接节点视觉定位方法。首先，通过激光焊接区域的视觉定位，实现了对焊缝的精确定位。该方法利用视觉传感器获取焊接区域的图像，并通过根据激光三角测量原理确定 AH36 钢激光焊接图像中的焊接区域。以此为基础，考虑到激光焊接区域常常受到噪声干扰，会影响焊缝节点的准确定位。因此，第二部分本设计了一种图像预处理方法。从图像去噪和图像边缘细节提取两方面有效地降低噪声的影响，提高焊缝节点定位的准确性。最后，本设计基于 Shi-Tomasi 算法设计了焊接节点定位流程。

1 激光焊缝节点定位技术设计

1.1 激光焊接区域视觉定位

激光焊接视觉定位可以帮助激光焊接系统精确地控制焊接操作，并实时监测焊接过程中的质量和位置偏差。这一过程往往需要结合视觉传感器完成区域定位工作，节点定位之前，确定相关区域是区域定位的关键步骤之一。在

视觉传感器中^[10]，离轴角 γ 、分离角 β 和扫描锥角 α 属于重要的角度，离轴角 γ 通常在区间 $[0, 360]$ 内取值，与检测点成像结果之间存在一定关联；扫描锥角 α 代表旋转透镜在扫描过程中的最大角度；分离角 β 为激光二极管轴线与 CCD 摄像机主光轴之间的角度，在像素平面坐标系中， β 会直接影响图像采集质量与激光轨迹椭圆度。本文在扫描激光焊接区域时使用的是图 1 所示的 Cognex In-Sight 8405 视觉传感器，其具体参数如表 1 所示。

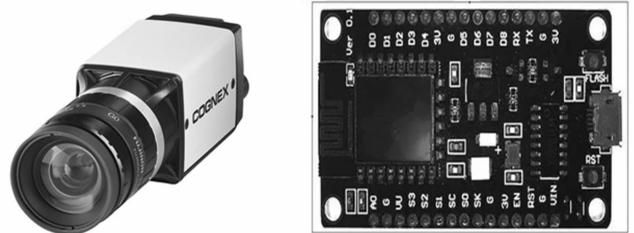


图 1 Cognex In-Sight 8405 视觉传感器

表 1 视觉传感器参数

项目	参数
分辨率	2 592 像素 × 2 048 像素
传感器类型	CMOS
传感器尺寸	1 英寸
像素大小	3.45 微米
帧速率	最高可达 60 帧/秒
颜色编码	RGB
接口类型	GigE Vision
位深度	8 位
镜头接口	M12 或 C/CS Mount

在扫描机构工作时会形成环形激光检测轨迹，这是由于激光在发射的过程中快速旋转形成，其成像过程通过以下两个过程获取 AH36 钢的三维区域信息：

1) 扫描系统在激光通过二极管发射后快速旋转，形成环形激光轨迹，并在 AH36 钢中投射轨迹；

2) 在 AH36 钢表面中形成环形激光轨迹，通过漫反射在面阵 CCD 摄像机中成像。具体过程如下：

在激光锥体坐标系中，激光焊发生的环形激光轨迹与落在焊接对象 AH36 钢上的交点坐标用 $A(x_L, y_L, z_L)$ 来表示，用 $A'(x_p, y_p)$ 表示像平面中点 $A(x_L, y_L, z_L)$ 的摄像机坐标，用 $A'(x_L, y_L, z_L)$ 表示成像点坐标，可通过下式计算得到：

$$\begin{cases} x_L = -x \cos \beta + k \beta \\ y_L = -y \\ z_L = k \cos \beta + x \sin \beta \end{cases} \quad (1)$$

式中， k 为两个坐标系原点之间的距离。用 $O'(k' \sin \beta, 0, k' \cos \beta)$ 表示摄像机镜头中心点坐标，其中 k' 代表激光锥体坐标原点与摄像机镜头中心点间的距离， AA' 构成的直线簇 $\{k\}$ 中包含了点 O' 和点 P' ，此时存在下式：

$$\frac{x_L - k' \sin \beta}{m} = \frac{y_L}{n} = \frac{z_L - k' \cos \beta}{\sigma} \quad (2)$$

式中, n 表示 y 方向上的距离; m 表示 x 方向上的距离; σ 表示 z 方向上的距离。

在激光锥体坐标系中, 任意点坐标 (x_L, y_L, z_L) 与半径 r 的关系为:

$$(x-r)^2 + y^2 = r^2 \quad (3)$$

上式即为锥体曲线方程, 当 x_L 的值不为零时, 半径 r 可通过下式计算得到:

$$r = \frac{x_L^2 + y_L^2}{2x_L} \quad (4)$$

用 r_0 表示传感器的设计半径, 用 z_L 表示检测点的深度, 基于图像识别的 AH36 钢激光焊缝节点定位技术根据激光锥体投影规律和环形激光设计原理^[11-12] 得到两者之间的关系:

$$\begin{cases} \frac{r}{r_0} = \frac{175 - z_L}{175} \\ z_L = \frac{175(r_0 - r)}{r_0} \end{cases} \quad (5)$$

当 x_L 的值为零时, 根据激光三角测量原理计算检测点的深度 z_L 为:

$$z_L = \frac{\Delta(k' - f)}{f \sin\beta + \cos\beta |\Delta|} \quad (6)$$

式中, Δ 表示 x 轴方向中激光像点在摄像机坐标系中移动的距离; f 代表的是镜头焦距, 上式即为焊接 3D 计算视觉区域定位结果, 利用该方法获得 AH36 钢激光焊接图像的区域。

1.2 激光焊接区域的图像预处理

上文计算得到 AH36 钢激光焊接区域, 由于激光焊接过程中, 可能产生烟雾、光线变化、震动等各种干扰和噪声, 降低图像质量。除此以外, 原始图像中可能存在比较弱的或模糊的特征, 可能影响定位的准确性。因此, 在该部分通过 EGDNet 算法对上述过程获取的 AH36 钢激光焊接区域图像展开预处理, 预处理过程由两个部分构成, 第一部分是图像去噪, 第二部分是图像边缘细节提取。通过降噪和边缘细节提取, 增强特征的对比度和清晰度, 使焊接区域更加突出, 并提供更可靠的特征信息, 有助于定位精度的提升。

1) 去噪模块:

将卷积神经网络 FFDNet 架构 (图 1) 应用在去噪模块中^[13-14], 将 AH36 钢激光焊接区域图像输入去噪模块中, 为实现噪声水平图 Q 能够准确获取, 利用下采样操作调整像素位置, 在此基础上, 将下采样图像与噪声水平图输入到卷积神经网络。在去噪模块中对图像展开残差学习, 获

得噪声残差图。通过零填充方法在去噪模块中调整特征图的大小。具体过程如图 2 所示。

设 y 代表去噪后的激光焊接图像, 设置数据保真项 $|z' - z_L|^2 / 2\zeta$, 大部分图像去噪算法可通过下式描述:

$$d = \operatorname{argmin}_x \frac{|z' - z_L|^2}{2\zeta^2} + \mu\varphi(x) \quad (7)$$

式中, $\varphi(x)$ 表示正则化项; x 表示不存在噪声的图像真值; x' 表示存在噪声的图像; ζ 表示高斯噪声的等级; 在图像去噪过程中, 可以利用参数 μ 对正数据保真项与正则化项之间的动态平衡进行调整, 当参数 ζ 的值较大时, 在去噪过程中会消除图像中存在的细节信息; 当参数 ζ 的值较小时, 无法有效的消除图像中存在的噪声。

在深度学习的基础上通过下式完成图像去噪:

$$d = F(z', \zeta, \theta) \quad (8)$$

式中, $F(\cdot)$ 表示深度学习函数; θ 为卷积神经网络参数。通过复制和扩充高斯噪声 ζ 获得噪声水平图 Q , 此时可通过下式描述 AH36 钢激光焊接图像的去噪过程:

$$d = F(z', Q, \theta) \quad (9)$$

2) 边缘模块:

考虑到去噪后的 AH36 钢激光焊接图像可能会变得模糊或失去一些细节。因此, 在去噪之后, 利用边缘模块提取图像细节提取, 强调和突出图像中的边缘和细节信息。VGG-16 是在大规模图像分类任务上进行训练的, 这一过程中, VGG-16 网络学到了很多普适的图像特征, 这些先验知识可以帮助网络在边缘细节提取任务中更好地理解 and 捕捉图像中的边缘结构。因此, 将 VGG-16 网络结构作为边缘模块的整体结构, 边缘模块由最大池化层、ReLU 加 Conv 两部分构成。将上述去噪后的 AH36 钢激光焊接图像输入边缘模块中, 通过池化操作、卷积操作和融合操作, 获得图像的边缘图^[15-16], 边缘模块的网络参数如表 2 所示。

表 2 边缘模块网络参数

层	池化	核尺寸	步长	通道数
第 1 层	1	3×3	1	64
第 2 层	1	3×3	1	64
最大池化层	0	2×2	2	64
第 3 层	1	3×3	1	128
第 4 层	1	3×3	1	128
最大池化层	0	2×2	2	128
第 5 层	1	3×3	1	256
第 6 层	1	3×3	1	256
第 7 层	1	3×3	1	256

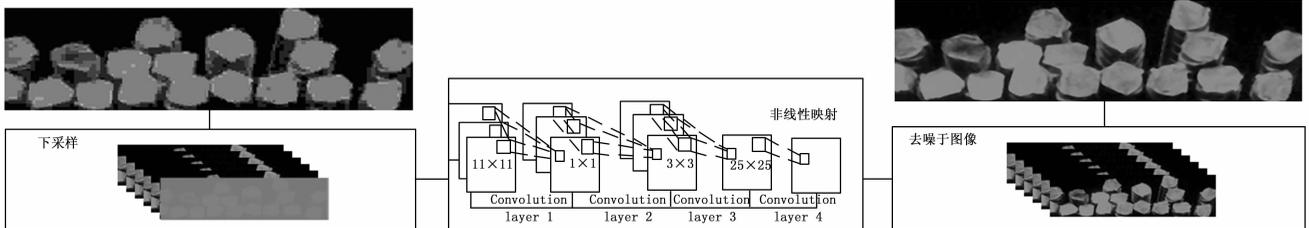


图 2 卷积神经网络 FFDNet 架构图

在表 1 所示的边缘模块中, 设计 AH36 钢激光焊接图像边缘细节提取步骤如下。

步骤 1: 数据预处理。将 AH36 钢激光焊接图像进行灰度化处理, 去除彩色信息并转换为灰度图像, 减少光照变化对图像的影响, 并提高后续处理算法的效果。

步骤 2: 边缘检测。使用 Canny 边缘检测算法, 以便快速定位 AH36 钢激光焊接图像中的焊缝位置

步骤 3: 边缘增强。通过应用拉普拉斯滤波器增强焊缝图像中的边缘特征, 并提高焊缝边缘的清晰度和对比度。

步骤 4: 非极大值抑制。为了保留焊缝边缘的细节以及消除可能的边缘厚度问题, 通过检查每个像素点的梯度方向和大小, 将非局部最大值的像素置为零, 只保留焊缝边缘上的局部极大值。

步骤 5: 细化算法。使用细化算法对焊缝边缘进行进一步的优化, 以去除冗余像素并得到更准确的焊缝线形。

步骤 6: 后处理。应用形态学膨胀、腐蚀操作填充断裂的焊缝线段或消除不需要的边缘。

1.3 基于 Shi-Tomasi 算法的焊接节点定位

Shi-Tomasi 算法是一种基于角点的特征点检测算法, 它通过计算图像中每个像素点的响应函数来寻找具有灰度变化较大等良好角点属性的像素。考虑到边缘细节提取后的 AH36 钢激光焊接图像中, 焊接节点通常位于焊缝的起始和结束端, 是焊接区域中重要的关键点, 具有良好的角点属性。因此, 在通过上述操作完成区域图像的预处理后, 利用 Shi-Tomasi 算法完成处理后的区域边缘图像角点的检测, 以此为基础进一步完成焊接节点的定位。具体步骤如下所示:

用 $O(x, y)$ 表示点 (x, y) 激光焊接区域图像中的灰度值, 将其作为中点, 构建窗口, 其大小为 $w \times w$ 。在激光焊接图像中, 通过互相关函数 $R(x, y)$ 表示局部激光焊接图像的灰度变化程度:

$$R(\Delta x, \Delta y) =$$

$$d \sum_{(x,y) \in w} \omega(x,y)[O(x+\Delta x, y+\Delta y) - O(x,y)]^2 \quad (10)$$

式中, $(\Delta x, \Delta y)$ 为窗口在图像中移动的位移; $\omega(x, y)$ 代表的是高斯滤波器。

研究表明, 焊接节点的灰度值变化最大, 因此对上式做泰勒展开处理^[17-18], 获得 $R(\Delta x, \Delta y)$ 的最大值:

$$R_{\max}(\Delta x, \Delta y) = \Delta x^2 O_x^2 + 2R(\Delta x, \Delta y) + \Delta y^2 \sum_{(x,y) \in w} \omega(x,y) O_y^2 \quad (11)$$

式中, O_x 、 O_y 分别表示 x 方向和 y 方向中灰度图像对应的偏导数, 其表达式分别如下:

$$\begin{cases} O_x = O \oplus [-1, 0, 1]^T = \frac{\partial O}{\partial x} \\ O_y = O \oplus [-1, 0, 1]^T = \frac{\partial O}{\partial y} \end{cases} \quad (12)$$

式中, \oplus 代表的是卷积操作, 设置矩阵 Y :

$$Y = R_{\max}(\Delta x, \Delta y) \begin{bmatrix} O_x^2 & O_x O_y \\ O_x O_y & O_y^2 \end{bmatrix} \quad (13)$$

用 λ 、 κ 表示矩阵 Y 的特征值, 根据特征值划分激光焊接节点图像:

1) 节点区域: 当 $\lambda \approx \kappa$, $\lambda \kappa \geq 0$ 时, 表明在不同方向中该区域的强度变化较为显著, 属于节点区域;

2) 边缘区域: 当 $\lambda \geq \kappa$ 或 $\kappa \geq \lambda$ 时, 在一个方向中区域的变化较大, λ 、 κ 之间存在较大差异;

3) 平滑区域: 当 $\lambda = 0$ 、 $\kappa = 0$ 时, 任何任意方向中, 其区域的强度变化均可以被忽略。

通过下式计算特征值 λ 、 κ 对应的最小值 T :

$$T = Y \min(\lambda, \kappa) \quad (14)$$

设定阈值 γ , 通过 Shi-Tomasi 算法^[19-20]对比 T 和 γ 的大小, 当阈值 γ 小于 T , 且 $\lambda \geq l \xi_{\max}$, $\kappa \geq \lambda$ 时, 像素点属于 AH36 钢激光焊接节点, 其中 l 代表的是抑制常数; ξ_{\max} 表示任意像素点最小特征值在 AH36 钢激光焊接图像中的最大值。

确定节点位置后, 在向量正交法的基础上确定节点对应的坐标。

用 a 表示像素节点, 节点在 AH36 钢激光焊接图像中位于 q , 设 D_{a_i} 代表的是 q 的邻域点 a_i 对应的梯度, 通过下述函数计算节点在激光焊接图像中的亚像素位置坐标 $g(q)$:

$$g(q) = \sum \epsilon_i^2 = T \sum [D_{a_i}(q - a_i)] \quad (15)$$

式中, ϵ_i 代表的是正交程度^[20]。

将 ϵ_i 的值设置为 0, 对坐标 $g(q)$ 求偏导, 获得下式:

$$\sum_i (D_{a_i} \cdot D_{a_i}^T) g(q) - \sum_i (D_{a_i} \cdot D_{a_i}^T \cdot a_i) = 0 \quad (16)$$

令:

$$\begin{cases} q = \begin{bmatrix} q_x \\ q_y \end{bmatrix} \\ D_{a_i} = \begin{bmatrix} h_x \\ h_y \end{bmatrix} \\ a_i = \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \end{bmatrix} \end{cases} \quad (17)$$

式中, h_x 、 h_y 均代表的是梯度向量^[21]。此时获得节点 q 在 AH36 钢激光焊接图像中的位置:

$$q = \begin{bmatrix} \sum h_x^2 & \sum h_x h_y \\ \sum h_x h_y & \sum h_y^2 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \sum h_x^2 x_i & \sum h_x h_y y_i \\ \sum h_x h_y x_i & \sum h_y^2 y_i \end{bmatrix} \quad (18)$$

2 实验与分析

2.1 实验设置

为了验证本文的激光焊接节点定位技术的整体有效性, 按照下述内布置实验环境, 展开相关测试。

1) 实验对象:

尺寸为 100 mm × 100 mm × 5 mm 的 AH36 钢板, 利用图 3 所示的 Trumpf TruLaser Station 5005 激光焊接机进行焊接。

Trumpf TruLaser Station 5005 激光焊接机具体参数如



图 3 激光焊接机

表 3 所示。

表 3 激光焊接机参数

项目	参数
激光源	固态激光器
激光功率	小于等于 3 000 W
波长	1 064 纳米
工作台尺寸	1 000 毫米×500 毫米
焊接速度	典型工作台尺寸为根据具体应用和焊缝要求可调整,通常达到几米每分钟的速度
光束质量	4 mm * mrad
焊缝宽度	根据具体参数设定,在数毫米到几十毫米之间

2) 实验图像数据处理:

摄像设备选用 Basler ace U acA3800-14uc 高分辨率工业相机,用于获取焊接过程中的图像,并配备高性能处理器和足够内存的计算机,用于运行图像处理和识别算法。软件环境:Python 编程语言,OpenCV 图像处理库。实验用 Basler ace U acA3800-14uc 高分辨工业相机型号基本参数如表 4 所示。

表 4 高分辨工业相机型号基本参数

项目	参数
分辨率	3 840 像素×2 748 像素
传感器类型	CMOS
传感器尺寸	1 英寸
像素大小	4.5 微米
帧速率	最高可达 14 帧/秒
颜色编码	RGB
接口类型	USB 3.0
位深度	8 位
镜头接口	C/CS Mount

3) 算法参数设置:

本文实现定位方法主要是 FFDNet 架构,因此设定如下参数:网络层数 4 层;卷积核大小为 3×3;激活函数类型为 ReLU;学习率为 0.001。

在上述实验设置下,分别利用所提方法、文献 [3] 方法和文献 [4] 方法进行实验。

2.2 定位实验

在激光焊接节点定位过程中,图像采集至关重要。图像采集结果直接影响着焊接节点定位精度。现采用所提方法、文献 [3] 方法和文献 [4] 方法作为 AH36 钢激光焊接节点定位对比方法,采集结果如图 4 所示。

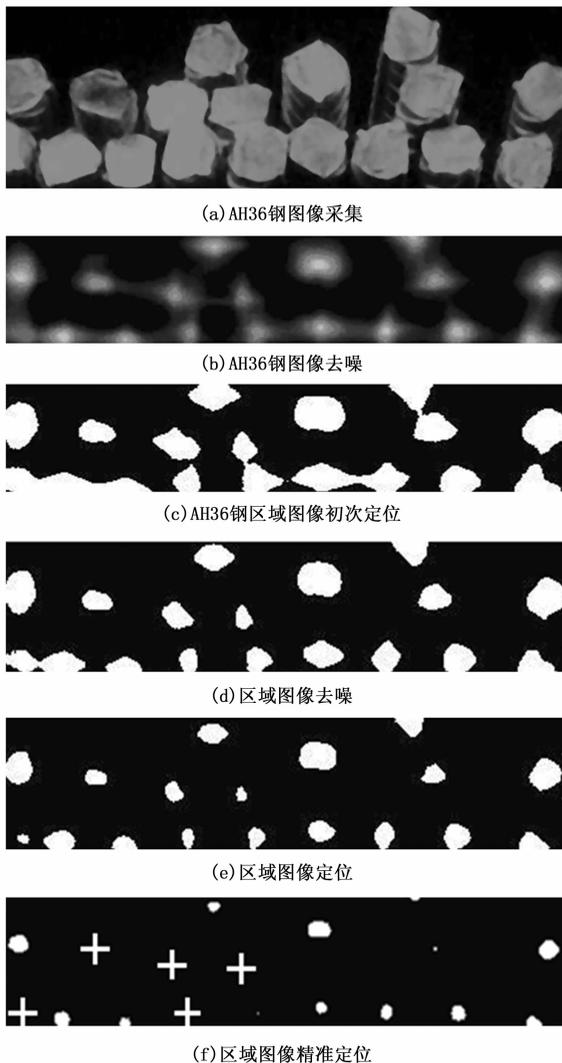


图 4 AH36 钢激光焊接区域定位

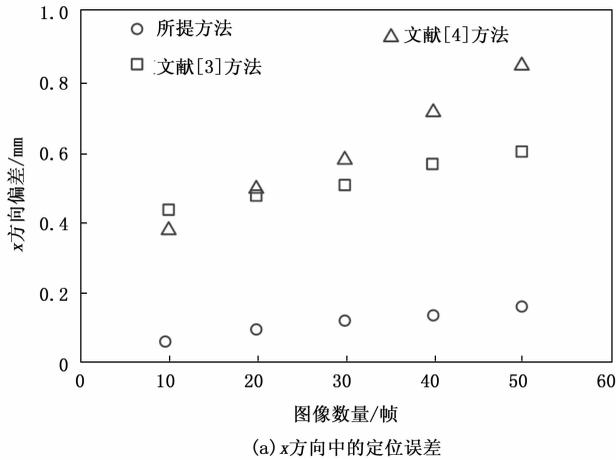
由图 4 可知,采用所提方法获取的 AH36 钢激光焊接图像区域的清晰度较高,AH36 钢激光焊接图像中存在高斯噪声和纹理噪声,图像的清晰度较好,去噪效果较好,有利于后续焊接节点的定位。其主要原因是所提方法利用去噪模块中的卷积神经网络 FFDNet 架构,通过下采样调整像素位置,并将下采样图像与噪声水平图输入到卷积神经网络,通过训练去除激光焊接图像噪声,有效提高了特殊材料激光焊接区域定位效果。

2.3 实验结果分析

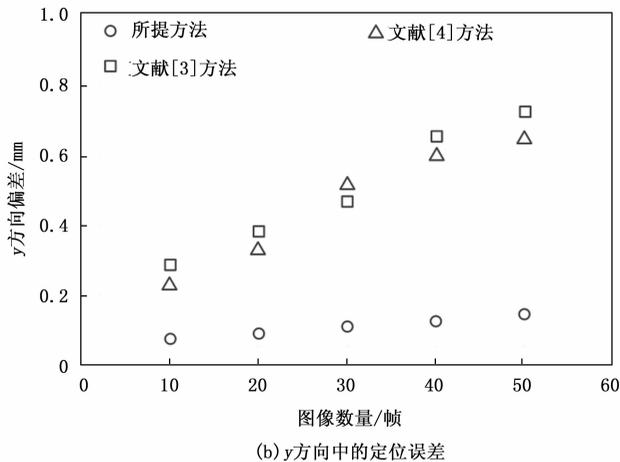
1) 定位误差:

定位误差是指实际定位结果与真实位置之间的差异。在激光焊接节点视觉定位实验中,通过算法和技术手段获

取得的焊接节点位置与实际焊接节点位置之间的偏差或距离被称为定位误差。定位误差可以用来评估定位算法的准确性和稳定性，较小的定位误差意味着更准确的定位结果。采用所提方法、文献 [3] 方法和文献 [4] 方法对 AH36 钢激光焊接节点定位，对比不同方法在 x 方向和 y 方向中的定位误差，测试结果如图 5 所示。



(a) x 方向中的定位误差



(b) y 方向中的定位误差

图 5 不同方法在 x 、 y 方向中的定位误差

由图 5 可知，三种方法在 x 和 y 方向的定位误差与图像数量之间呈正比，在相同图像数量下，所提方法在两个方向中的定位误差均控制 0.2 mm 以内，文献 [3] 方法在两个方向中的定位误差均控制 0.8 mm 和 0.72 mm 以内，文献 [4] 方法在两个方向中的定位误差均控制 0.6 mm 和 0.7 mm 以内。对比上述数据可知，所提方法的定位误差小于两种对比方法，优于其他两种方法的定位误差测试结果，表明所提方法在定位过程中具有较高的精度。产生该结果的主要原因是所提方法在获取 AH36 钢的激光焊接节点区域图像的基础上，通过 EGDNet 算法获取焊接节点边缘图像，提高了定位精度。

为进一步对所提方法的精度进行验证，利用所提方法对 AH36 钢激光焊接节点定位，对比并记录 x 、 y 、 z 三个方向的定位误差数据，定位误差波动幅度越小，说明该方

法的定位精度越高。

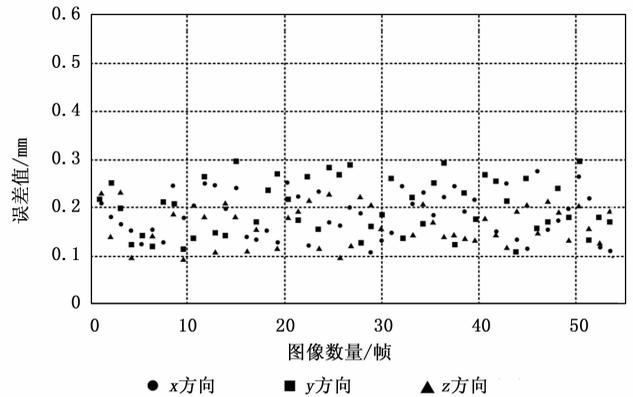


图 6 所提方法定位误差图

分析图 6 实验数据可知，随着图像数量的增加，所提方法在 x 、 y 、 z 三个方向的定位数据较为均衡，误差始终不超过 0.2 mm，说明所提方法具有较好的定位精度，即所提方法 AH36 钢激光焊接节点定位过程中，在检测焊接边缘图像的角点的基础上，计算节点在 AH36 钢激光焊接图像中的位置坐标，有效优化了定位结果。

2) 定位时间:

定位时间是指从开始进行定位过程到获取到最终定位结果所经历的时间。在激光焊接节点视觉定位实验中，定位时间反映了定位算法的计算效率和响应速度。较短的定位时间意味对应定位算法具有更高效的 AH36 钢激光焊接节点定位效果。在上述测试环境下，测试所提方法、文献 [3] 方法和文献 [4] 方法定位焊接节点所需的时间，测试结果如图 7 所示。

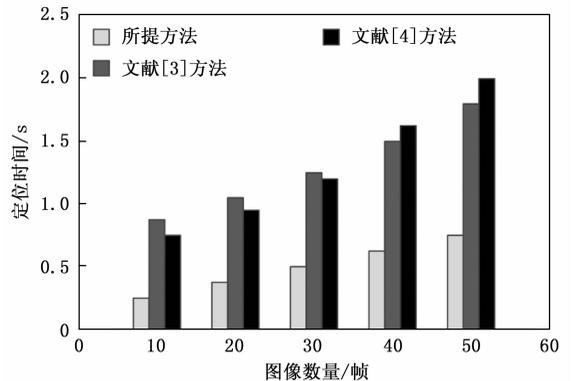


图 7 不同方法的定位时间

通过图 7 可知，随着图像数量的增加，所提方法消耗时间的上涨较为稳定，定位时长由 0.25 s 上涨至 0.75 s，最大定位时间为 0.75 s，说明该方法定位 AH36 钢激光焊接节点所需的时间较短。文献 [3] 方法随着图像数量的增加，定位时长由 0.8 s 上涨至 1.75 s，最大定位时间为 1.75 s。文献 [4] 方法随着图像数量的增加，定位时长由 0.75 s 上涨至 2.0 s，最大定位时间为 2.0 s。所提方法、文献 [3] 方法和文献 [4] 方法三种方法定位时间的增长幅度分别为

0.5 s、0.95 s 和 1.25 s, 因此, 所提方法在定位效率较高的同时具有一定的稳定性。综上分析可知, 所提方法的定位效果优于文献 [3] 方法和文献 [4] 方法, 表明所提方法具有较好的实际应用价值。

3) 精度衰减测试:

精度衰减是指在不同焊接条件下, 定位精度的变化情况。通过改变激光功率、焊缝宽度等焊接参数来模拟不同的焊接条件, 在此基础上进行定位实验, 分析定位精度与上述因素之间的关系, 以判断是不同定位方法的适应性。实验时, 假设有两种不同的焊接参数设置: 方案 A 和方案 B。

方案 A 为: 激光功率为 100 W, 焊缝宽度为 1 mm;

方案 B 为: 激光功率为 200 W, 焊缝宽度为 2 mm。

使用相同的激光焊接机器人和相机, 在不同焊接参数下进行焊接节点视觉定位的实验。记录每个焊接节点在实际位置和视觉定位结果之间的误差, 以评估精度衰减情况。结果如图 8 所示。

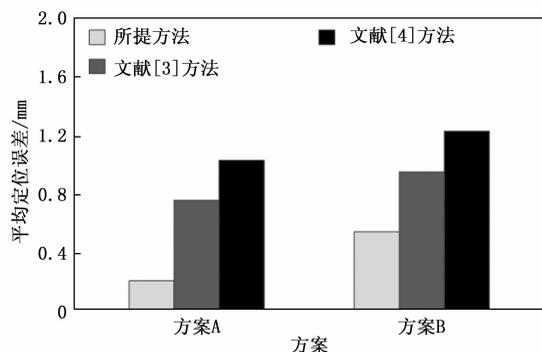


图 8 不同方法的精度衰减

通过图 8 可知, 三种方法随着激光功率和焊缝宽度的增加, 精度衰减导致了焊接节点定位的准确性下降。其中, 所提方法在方案 A 中对焊接节点的平均定位误差为 0.2 mm, 在方案 B 中, 焊接节点的平均定位误差增加到 0.5 mm。文献 [3] 方法和文献 [4] 方法两种方法在方案 A 中对焊接节点的平均定位误差为 0.7 mm 和 1.0 mm, 在方案 B 中, 焊接节点的平均定位误差增加到 1.1 mm 和 1.3 mm。所提方法对比文献 [3] 方法和文献 [4] 方法两种方法而言, 精度衰减幅度较小, 受激光功率和焊缝宽度的增加影响较小。

4) 抗干扰性能:

在实际应用中, 焊接过程可能面临光照变化、背景噪声、材料表面质量、姿态变化等各种干扰因素, 这些因素可能对视觉定位技术的性能和准确性产生不利影响。因此, 分析三种方法的抗干扰性能。

在基准实验环境下, 将 AH36 钢板放置于平整的工作台上, 确保激光焊接系统和相机处于正常工作状态。对焊接节点进行预先标记, 以便进行后续的定位。通过调整光源的亮度或引入额外的光源来模拟光照变化。同时, 随机添加少量杂质构造背景噪声。使用相同的焊接节点图像进

行多次实验取平均值, 并记录定位误差。结果如表 5 所示。

表 5 不同方法的抗干扰性能

	噪声类型	所提方法定位误差/mm		文献[3]方法定位误差/mm		文献[4]方法定位误差/mm		
		平均值	标准差	平均值	标准差	平均值	标准差	
理想环境	噪声约等于 0	0.20	0.05	0.26	0.11	0.32	0.17	
背景噪声	光照变化	15	0.26	0.06	0.32	0.12	0.38	0.18
		20	0.33	0.07	0.39	0.13	0.45	0.19
		25	0.39	0.09	0.45	0.15	0.51	0.21
		30	0.42	0.10	0.48	0.16	0.54	0.22
	均值	0.35	0.08	0.41	0.14	0.47	0.20	
	杂质直径变化	0.3	0.30	0.07	0.36	0.13	0.42	0.19
		0.5	0.38	0.09	0.44	0.15	0.50	0.21
		0.7	0.42	0.11	0.48	0.17	0.54	0.23
		0.9	0.50	0.13	0.56	0.19	0.62	0.25
		均值	0.40	0.10	0.46	0.16	0.52	0.22

通过表 5 可知, 在不同背景噪声条件下定位误差相对于基准实验环境有所增加, 三种方法对于光照变化和杂质引入的背景噪声具有一定的影响, 导致定位精度略有下降。其中, 所提方法在基准实验环境下的定位误差平均值为 0.2 mm, 标准差为 0.05 mm, 在引入背景噪声后, 光照变化时的平均值为 0.35 mm, 标准差为 0.08 mm, 杂质引入时的平均值为 0.4 mm, 标准差为 0.1 mm。文献 [3] 方法和文献 [4] 方法无论是在基准实验环境中还是在不同背景噪声条件下, 定位误差平均值和标准差都高于所提方法。整体而言, 所提方法受光照变化和杂质引入的背景噪声影响较小, 具有较高的抗干扰性能, 误差波动范围较小, 可以精准的实现 AH36 钢激光焊接节点视觉定位。

3 结束语

为了满足人们对激光焊接节点的定位精度更高的要求, 解决激光图像采集质量低、定位精度低和定位效率低的问题, 本文设计一种针对 AH36 钢的激光焊接节点视觉定位技术。该方法通过消除焊接节点区域图像中存在的噪声, 避免噪声对节点定位产生影响, 再通过设计节点定位方法, 优化了 AH36 钢激光焊接节点视觉定位效果, 为激光焊接技术的智能化发展提供了参考。通过针对 AH36 钢的激光焊接节点视觉定位实验, 得出以下结论:

1) 所提技术能够有效地捕获焊接节点的图像信息, 并提供清晰、高质量的图像供后续的定位处理使用。

2) 所提方法在 x 、 y 、 z 三个方向上, 表现出了较小的定位误差, 整体定位误差波动幅度越小, 满足焊接任务的准确定位需求。

3) 所提方法展示出了较快的定位速度, 能够在短时间内完成 AH36 钢激光焊接节点定位任务, 提高了生产效率和焊接工艺的稳定性。

(下转第 314 页)