引用格式:吴铮,曾俊冬,胡安铎,等.基于宽带通视觉传感的GTAW图像采集及处理[J].热加工工艺,2025,54(11):108-113.
DOI:10.14158/j.cnki.1001-3814.20232145
http://www.rjggy.net rjggy@vip.163.com

基于宽带通视觉传感的 GTAW 图像采集及处理

吴 铮,曾俊冬,胡安铎,卞正兰
(上海电力大学 电子与信息工程学院,上海 201306)

摘 要:在焊接自动化向智能化发展过程中,需要实时采集清晰的焊接过程图像,用于监测熔池形态、追踪焊缝、优化焊接参数和轨迹等。但由于强弧光的干扰,常规动态范围小于 100 dB 的视觉传感器很难清晰捕捉到熔池、钨极和焊缝等关键焊接信息。为此,在 86 dB 动态范围的视觉传感器基础上增加宽带通光学滤光片和中性密度滤光片,并与双高斯滤波算法相结合来采集焊接过程的图像。根据弧光光谱的分布,选择了 350~670 nm 的宽带通滤光片,不仅可以滤除红外波段的强弧光辐射,而且克服了使用窄带通滤光片成像颜色单一的缺点。结果表明:采用双高斯滤波算法提升熔池和焊缝区域的对比度,处理后焊接图像的焊缝和熔池边缘的细节更加明显,图像中的信息也更加清晰。

关键词:焊接图像采集;宽带通滤光片;双高斯滤波;图像增强
中图分类号:TG409 **文献标识码**:A **文章编号**:1001-3814(2025)11-0108-06

GTAW Image Acquisition and Processing Based on Wide-band Pass Visual Sensing

WU Zheng, ZENG Jundong, HU Anduo, BIAN Zhenglan
(College of Electronics and Information Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 201306, China)

Abstract: During the development of welding from automation to intelligence, it requires real-time acquisition of clear images of the welding process for monitoring the weld pool morphology, tracking the weld seam, and optimizing the welding parameters and trajectory. However, due to the interference of strong arc light, it is difficult for conventional vision sensors with a dynamic range of less than 100 dB to clearly capture key welding information such as the weld pool, tungsten pole and weld seam. Therefore, a wide-band pass optical filter and a neutral density filter were added on the basis of the vision sensor with 86 dB dynamic range, and a double Gaussian filtering algorithm was combined to capture the welding process image. According to the distribution of the arc light spectrum, a wide-band optical band-pass filter in 350-670 nm was selected, which not only filtered out the strong arc light radiation in the infrared band, but also overcomed the disadvantage of single-color image by using the narrow-band pass optical filter. The results show that when the double Gaussian filtering algorithm is used to enhance the contrast between the weld pool and the weld seam region, the details of the weld seam and weld pool edge of the processed welding image are more visible, and the information in the image is clearer.

Key words: welding image acquisition; wide-band pass filter; double Gaussian filtering; image enhancement

钨极气体保护电弧焊(gas tungsten arc welding, GTAW)因其良好的焊接质量而被广泛应用于同类和异类金属的焊接。GTAW智能化,需要准确获取钨极、熔池、焊缝、电弧轮廓等信息,用于实现预测熔深、焊缝跟踪、焊缝缺陷预警等智能化功能[1-2]。由于焊接产生的弧光干扰不仅光强度高,而且存在光分布不均匀等问题,导致焊缝和熔池区域对比度较低,因此需要通过专业的焊接图像采集及处理来获取清晰准确的图像。

焊接图像采集方法分为主动视觉和被动视觉两种[3-4]。主动视觉系统一般需要外部光源辅助拍摄,例如常用激光作为外部辅助光源,这增加了系统的复杂性和成本。而被动视觉系统利用电弧和熔池自身辐射成像,系统相对简单,成本低廉,但由于强弧光干扰,需要使用高动态视觉传感器,方可获取清晰准

收稿日期:2023-08-30 **修回日期**:2025-01-07
基金项目:国家自然科学基金项目(62205195);上海市地方院校能力建设专项项目(20020500700)
作者简介:吴铮(1999-),男,山东枣庄人,硕士,主要研究方向:焊接视觉监测、焊接图像处理;E-mail:wuzheng9902@163.com
通讯作者:曾俊冬,男,四川绵阳人,博士,主要研究方向:焊接缺陷检测、焊接智能化;E-mail:iepjunlin@shiep.edu.cn

确的图像。相对于高动态范围视觉传感器,常规动态范围小于 100 dB 的视觉传感器，具有应用范围较广、工艺上更加成熟、价格低廉的优势,但很难清晰捕捉到焊接过程中的信息。为解决这一问题，一些学者使用不同波段的窄带通滤光片和中性密度滤光片来获取熔池图像[5-6]。窄带通滤光片只允许其中心波长附近的很窄波段的光透过,图像成像颜色单一,细节特征不明显。此外,方吉米等[7]根据近红外波段熔池辐射能量高、电弧辐射能量弱的特点,对比多种透红外滤光片和 1064 nm 窄带滤光片的成像效果。然而，在近红外波段普通工业相机的光谱响应相对较低,无法清晰观测焊缝等信息,因此需要选择相机光谱响应较高的波段成像,并适当增加通带宽度,同时结合图像滤波算法来提升成像质量。在焊接图像处理领域,高向东等[8]使用改进的巴特沃斯滤波函数对图像进行处理，对滤波函数乘以扩大倍数并增加偏移量以改善滤波效果。Lu 等[9]提出了一种改进的对比度受限自适应直方图均衡(CLAHE)算法和高斯掩码算法用于图像增强，并利用差分处理来降低噪声以增强图像的对比度。上述关于算法的改进和提升的研究取得了显著的效果，对于焊接图像本身的频域特性分析较少。

对于焊接过程中弧光太强、常规工业相机动态范围不足、窄带滤光片成像颜色失真的问题,本文选择 350～670 nm 宽带通滤光片和中性密度滤光片（ND2000）组合的被动视觉系统来采集焊接过程图像。它不仅能滤除弧光中较强的离散波段，而且与常规相机的光谱响应曲线相匹配，采集的图像信息丰富。对于图像中焊缝和熔池区域的对比度较低的问题,本文通过分析焊接图像的频域特征,提出了一种新的双高斯滤波算法来改善成像质量，以获取信息丰富、清晰度高的图像,有助于识别焊缝中的氧化物和观察熔池形态，为焊接缺陷的预警和焊接智能化的实现提供清晰的焊接图像信息。

1 焊接图像采集装置

1.1 系统总体介绍

焊接系统包括 Aristo TIG 4000i 氩弧焊机、WF-007A 自动送丝机、移动式焊接平台。焊接试验采用 15 mm 厚的 304 不锈钢板，采用 ER316L 焊丝。图像采集系统由 H264 摄像头模组（动态范围 86 dB）、46.05 mm 定焦微距镜头、可调中性密度滤光片和带通滤光片组成,整体试验系统如图 1 所示。本文中的焊接图像均在钨极气体保护电弧焊的方式下采集。

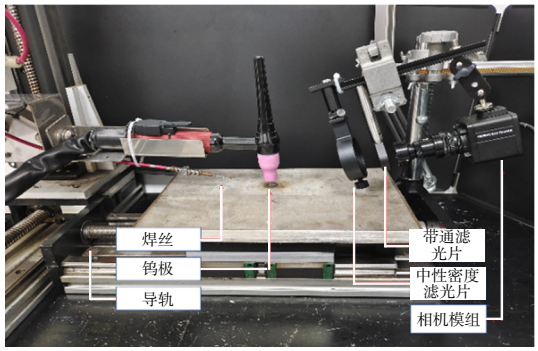


图 1 焊接图像采集试验系统
Fig.1 Welding image acquisition test system

1.2 光学带通滤波器的选择

在焊接过程中，使用 Ocean QE65pro 光谱仪测出在 200～1000 nm 波段的氩弧焊弧光光谱图,如图 2 所示。电弧光谱由连续谱和离散特征谱组成,为降低强弧光对成像的干扰，应避开电弧辐射较强和离散谱较多的波段(700～850 nm)。此外,在成像波段选择时，还应考虑常规相机在可见光波段灵敏度较高等影响因素,并适当加宽成像波段,以提升熔池自身的辐射量[10]。

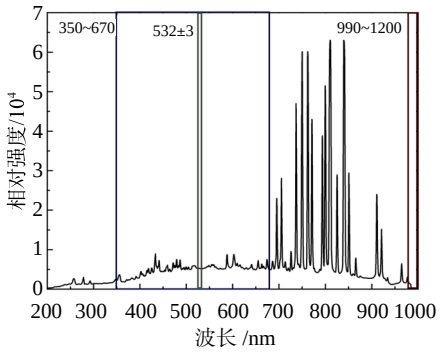


图 2 焊接电弧光谱图
Fig.2 Welding arc spectrum

图 3(a)是使用 86 dB 视觉传感器直接拍摄的焊接过程画面,画面中的强弧光遮挡了大部分的信息。根据焊接弧光光谱的分析,532 nm 离散特征光谱线较少,适合作为成像波段[11]。使用 532 nm 窄带通滤光片的焊接图像如图 3(b)所示,图像颜色整体呈绿色,但由于成像颜色单一,熔池前端和弧光反射部分较为模糊,熔池边缘细节并不明显。为了获取色彩丰富、清晰度高的焊接过程图像，可适当增加成像带宽。在 990～1200 nm 波段,虽然离散谱线较少,但常

规工业相机在该波段的光谱响应较低，且清晰度较低，如图3(c)所示。在350～670 nm波段，连续光谱相对平滑，离散谱线较少。使用350～670 nm宽带通滤光片获得的图像如图3(d)所示，熔池和焊缝等主要区域较清晰。但是焊缝边缘的对比度相对较低，而且焊接过程中的高温和强弧光辐射对CMOS图像传感器造成了一定干扰。为了进一步提高成像质量，需要对图像进一步处理。



图3 窄带和宽带滤光片拍摄的焊接图像
Fig.3 Welding images taken by narrow-band and wide-band filters

2 双高斯滤波算法

2.1 焊接图像频域特征分析

图像频域的高频分量对应信号强度（亮度、灰度）变化剧烈的区域，例如边缘轮廓、细节纹路、噪声等。低频分量则对应了信号强度变化较小的区域，如图像的背景、较均匀的色块区等。焊接图像中的关键信息如图4所示。为区分在不同频域分量下焊接图像对应的信息，使用理想滤波器对图4进行分频处理，分频后的结果如图5所示。

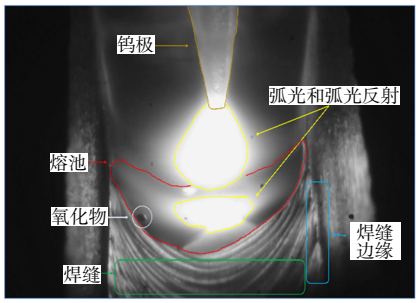


图4 原始灰度图像
Fig.4 Original grayscale image

图5(a)显示了焊接图像频域的低频分量对应的信息，主要包括弧光区域和图像背景；图5(b)显示了中频分量对应的信息，主要包括弧光反射、焊缝、钨极和熔池轮廓；图5(c)显示了高频分量对应的信息，包括熔池、钨极和焊缝的细节边缘以及高频噪声。综上，虽然弧光区域较亮，但信号强度变化幅度较小，对应的信息大多集中在低频段；虽然熔池、焊缝、杂质等信息在图像中的亮度较暗，但信号的变化幅度较大，对应图像频域的中频和高频段。为提升焊接图像质量，应选择性地滤除低频和高频段的信息，以降低强弧光和高频噪声对图像的干扰，并增强中频段的信息以提升焊缝和熔池区域的对比度。

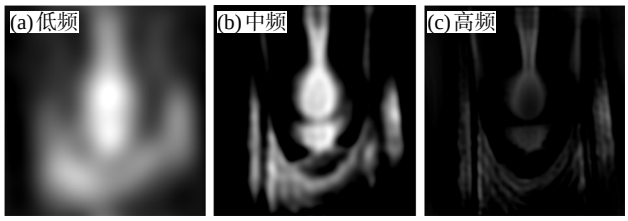


图5 不同分频后的焊接图像
Fig.5 Welding images after different frequency division

2.2 双高斯滤波函数

$H(u,v)$为双高斯滤波函数，其表达式为

$$H(u,v)=\begin{cases}1-\exp\left(\dfrac{D(u,v)}{2D_0^2}\right) & 0<R\leqslant 3D_0\\ \alpha & 3D_0<R\leqslant D_1\\ \exp\left(\dfrac{D(u,v)}{2D_1^2}\right) & D_1<R\leqslant \min\{M,N\}\end{cases} \quad (1)$$

$$R=\sqrt{\left(u-\frac{M}{2}\right)^2+\left(v-\frac{N}{2}\right)^2} \quad (2)$$

式中：R为像素点到频谱中心的距离；D_0为高斯高通函数截止半径；D_1为高斯低通函数通带半径；M、N分别为图像的长和宽；α为增强系数。

在图像频域的低频区，即$R\leqslant 3D_0$的区域，使用高斯高通函数进行滤波处理，滤除少量低频分量，用来降低强弧光的干扰，突出高频信息，提升图像对比度。由于滤掉了部分低频分量，图像的整体亮度会降低。为了弥补这一缺陷，需要在中频区，即$3D_0<R\leqslant D_1$的区域，对该区段内的频率信息增强α倍。因为中频段的信息对应焊接图像中弧光的反射、漫反射以及熔池、焊缝区域的轮廓信息，扩大α倍后对图像的亮度和焊缝和熔池区域的对比度均有较好的提升。在高频区($D_1<R\leqslant \min\{M,N\}$)，使用高斯低通函

数进行滤波。因为在高频段,不仅包含高频噪声,还包含图像的细节信息，理想的低通滤波器并不适合这种情况。与高斯低通滤波相比,理想的低通滤波器边界突变大,不仅会丢失图像的细节,还会因为边界的突然变化而产生振铃效应[12]。因此,使用高斯低通滤波器对高频区域进行滤波，在保留图像细节信息的同时较好地抑制了高频噪声。

图 6 为双高斯滤波二维示意图，中心黑色区域为高斯高通函数处理结果，白色区域为中频增强区域处理结果,最外侧为高斯低通函数处理结果。

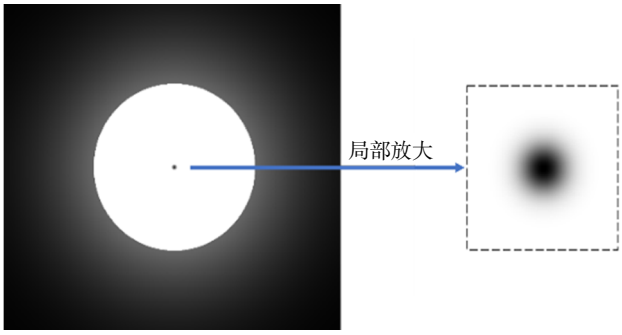


图 6 双高斯滤波示意图
Fig.6 Schematic diagram of double Gaussian filtering

图 7 为双高斯滤波前后的频谱图，频率从中心向外依次增加,最外侧为高频段。图 7(b)为滤波后的频谱图,相比于图 7(a)滤波前的频谱图,高频段的信息被抑制,中频段得到增强。

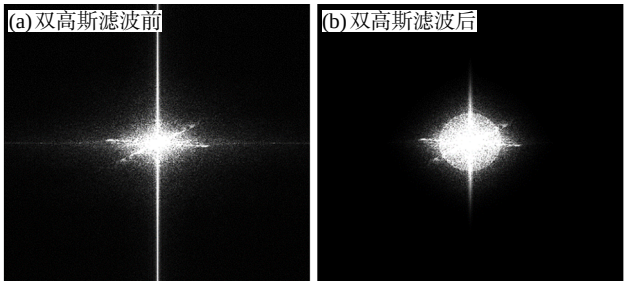


图 7 双高斯滤波前后频谱图
Fig.7 Spectrum map before and after double Gaussian filtering

2.3 函数分界点的设定

低频和中频的分界点为 $3D_0$，这是根据高斯函数的性质所决定的。在 $3D_0$ 区间外的函数值已经很小，因此高斯高通滤波器在 $3D_0$ 区域外的滤波效果已经很弱,故选择 $3D_0$ 区域作为中低频分界点,既不影响低频区域的滤波效果,又限定了滤波区域,让更多的中频段信息得以保留和进行后续增强处理。

中频段和高频段以 D_1 为分界,根据频谱中心能量衰减比决定。设 D_M 为频谱中心点的能量值,D_R 为距频谱中心距离 R 处的能量值。判断 D_Z 是否小于频谱中各点和中心点的比值 $\frac{D_M}{D_R}$，当满足判断条件 $D_Z \leqslant \frac{D_M}{D_R}$ 时,将此时像素点离中心的距离赋值给 D_1,即 $D_1=R$,以此作为中高频分界。一般设定 $D_Z=10^4$ 时增强效果较好。当滤波范围达到图像长度和宽度的最小值 min{M,N}时停止,因为此范围外频谱的高频频率分量极少,包含的关键信息较少,对图像的影响可以忽略,同时也减少了计算量。

3 实验结果及讨论

3.1 图像评价指标

平均梯度(Average Gradient,AG)反映图像小细节的对比度和纹理变化特征，同时反映图像的清晰度。数值越大,图像质量越好。AG 计算公式如下：

$$AG=\sum_{i=0}^{M-1}\sum_{j=0}^{N-1}\frac{\sqrt{(\Delta I_x^2+\Delta I_y^2)/2}}{M\times N} \tag{3}$$

特征区域的对比度 CON 如下：

$$CON=\sum_{\delta}\delta(i,j)^2P_\delta(i,j) \tag{4}$$

式中:$\delta(i,j)$为相邻像素间的灰度差;$P_\delta(i,j)$为像素分布概率。

3.2 常用算法图像效果对比

本文在空域采用直方图均衡算法和 CLAHE 算法[13],在频域采用理想低通滤波器和高斯高通滤波器算法[14-15],比较算法的增强效果。不同算法的效果如图 8 所示。图 8(a)为原始图像。直方图均衡算法的整体亮度有所提高,但对比度并未明显提升,如图 8(b)所示。图 8(c)显示,CLAHE 算法的对比度和亮度均有提升,但图像存在失真,噪声干扰明显。图 8(d)显示,经理想低通滤波后的图像虽然高频噪声减少了,但也丢失了一定的高频信息,导致图像中的细节信息较为模糊。图 8(e)显示,经过高斯高通滤波,焊缝和熔池区域对比度提升,但图像整体亮度偏暗,且图像中的高频噪声并未受到抑制。图 8(f)为双高斯滤波算法处理后的效果,和原图相比失真较小,且图像的整体亮度和焊缝及熔池区域的对比度均有一定的提升。

3.3 实验结果及评价

为了对比双高斯滤波后的灰度分布情况，选取 890列图像的灰度值,观察钨极、熔池和焊缝区域,其

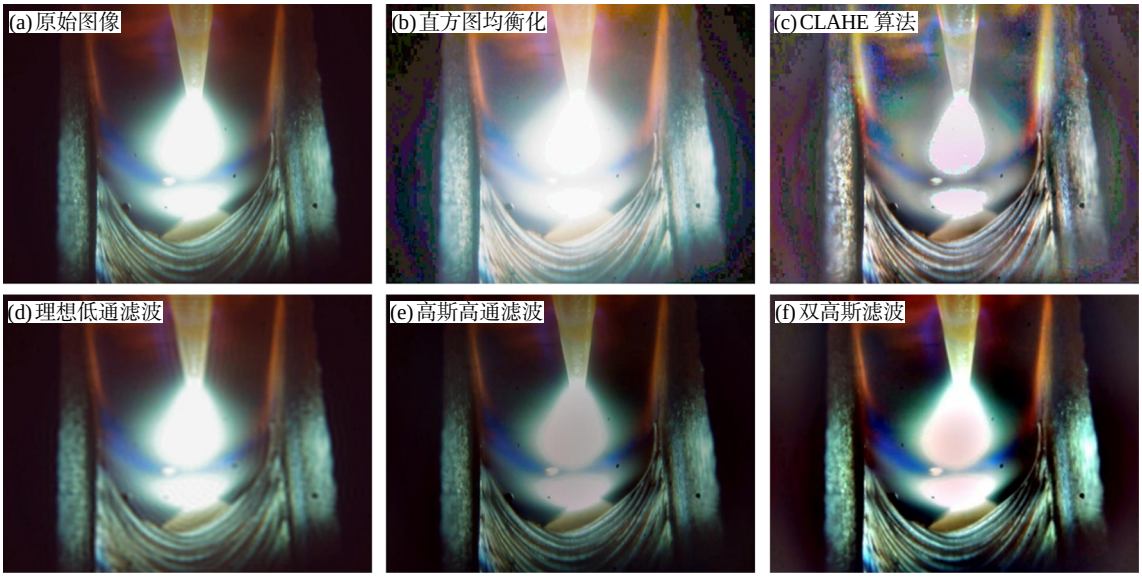


图 8　不同算法的图像对比
Fig.8　Image comparison of different algorithms

中图像分辨率为 1920 像素×1080 像素，如图 9(a)所示。从图 9(b)可以看出，经过双高斯滤波后，熔池、焊缝和钨极边缘的灰度差异增大，这反映出对比度的增加，灰度曲线的整体形状和分布趋势与原始图像高度相似，说明双高斯滤波后，图像的失真度较小。图 10 为不同算法处理后第 700 列的焊缝区域灰度分布情况。由图中可知，采用双高斯滤波算法处理后的图像的焊缝区域的灰度差值相比其他算法提升较多。

图 11(a)是使用高动态范围焊接相机(140 dB+)拍摄的图像，图 11(b)是本文(86 dB)最终的成像效果。虽然焊接电流、电压增加会导致电弧光的光强增加，但并不影响弧光的光谱分布情况和图像频谱中的高低频的分布趋势。为对比成像效果，两组图像均

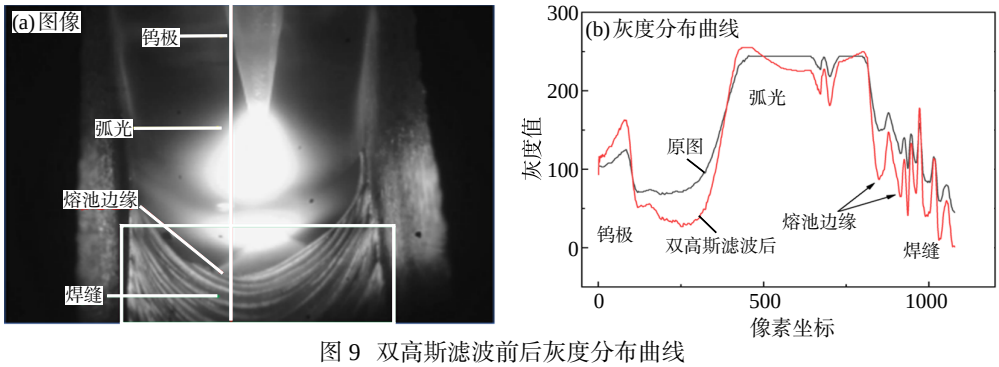


图 9　双高斯滤波前后灰度分布曲线
Fig.9　Grayscale distribution curve before and after double Gaussian filtering

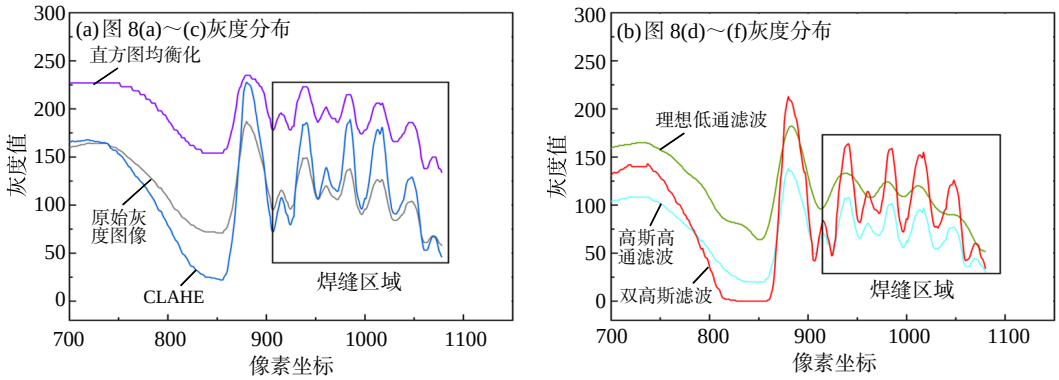


图 10　不同算法的焊缝区域灰度分布
Fig.10　The gray distribution of weld area in different algorithms

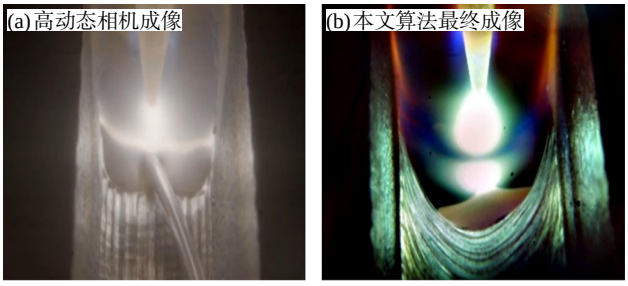


图 11 高动态相机成像和本文算法的成像效果对比
Fig.11 Comparison between high dynamic camera imaging and the imaging effect processed by the algorithm in this paper

在电流 100 A 的情况下获取。从图中可以看出,高动态范围相机对于强弧光抑制较好，但焊缝和熔池边缘对比度较低,电弧形状模糊。本文经光学滤光片和双高斯滤波算法结合最终获取的图像对比度更高，焊缝和熔池边缘更清晰,弧光的边界清楚,抑制效果也较好。

表 1 是高动态范围相机的成像和本文成像效果的客观指标对比。通过对两幅图片的对比度和平均梯度进行计算，本文成像效果在对比度和平均梯度(锐度)指标上优于高动态范围相机的成像效果。

表 1 成像效果对比
Tab.1 Comparison of imaging results

参数	高动态相机成像	本文最终成像
对比度 CON	2.797	9.464
平均梯度 AG	0.823	1.366

4 结论

（1）在低动态视觉传感器的基础上采用宽带通滤光片和可调中性密度滤光片并结合双高斯滤波算法来获取清晰的焊接过程的图像。与基于窄带滤波器的采集系统相比,该方法获得的图像色彩丰富、细节清晰。

（2）采用双高斯滤波算法，解决了熔池和焊缝对比度低的问题,同时有效抑制了干扰噪声,处理后的图像效果优于本文所列的其他算法。

（3）与高动态范围视觉传感器成像效果相比,本文成像方式下的熔池、焊缝细节清晰、对比度高,视觉效果好,焊接图像可用于焊接过程质量监测,有助于焊接视觉识别和智能焊接领域的使用。

参考文献:

[1] Wang Q, Cheng Y, Jiao W, et al. Virtual reality human-robot collaborative welding:a case study of weaving gas tungsten arc welding [J]. Journal of Manufacturing Processes,2019,48:210-217.

[2] Lu J, Zhao Z, Han J, et al. Hump weld bead monitoring based on transient temperature field of molten pool[J]. Optik, 2020,208:164031.

[3] Xu Y, Lv N, Zhong J, et al. Research on the real-time tracking information of three-dimension welding seam in robotic GTAW process based on composite sensor technology [J]. Journal of Intelligent & Robotic Systems,2012,68(2):89-103.

[4] Lei T, Rong Y, Wang H, et al. A review of vision-aided robotic welding[J]. Computers in Industry,2020,123:103326.

[5] Fan X A, Gao X, Liu G, et al. Research and prospect of welding monitoring technology based on machine vision[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2021,115(11/12):3365-3391.

[6] Liang Z M, Wang D L, Wang J, et al. Vision sensing of P-GMAW weld pool using narrow band filters with different center wavelengths [J]. China Welding,2013,22(1):41-46.

[7] 方吉米,王克鸿,黄 勇. 基于透红外视觉传感的 GMA-AM 熔池图像质量评价[J]. 焊接学报,2018,39(12):89-94.

[8] 高向东,赵传敏,白天翔,等. 傅立叶变换在熔池图像特征提取中的应用[J]. 焊接学报,2008,29(8):13-16.

[9] Lu P, Huang Q. Robotic weld image enhancement based on improved bilateral filtering and CLAHE algorithm [J]. Electronics,2022,11(21):3629.

[10] Zhao Z, Deng L S, Bai L F, et al. Optimal imaging band selection mechanism of weld pool vision based on spectrum analysis,2019,110:145-151.

[11] Wen H, Zeng J D, Bian Z L, et al. Study of weld pool monitoring system based on spatial filtering [J]. Journal of Manufacturing Processes,2022,76:638-645.

[12] Chen Y Y, Tai S C. Enhancing ultrasound images by morphology filter and eliminating ringing effect [J]. Eur J Radiol,2005,53(2):293-305.

[13] 齐影,谢贵生,武媛,等. 某牵引电机吊挂焊缝失效分析[J]. 热加工工艺,2023,52(5):154-157.

[14] Caraiman S, Manta V I. Quantum image filtering in the frequency domain [J]. Advances in Electrical and Computer Engineering,2013,13(3):77-84.

[15] Mishra A. Surface quality analysis of friction stir welded joints by using Fourier transformation and local binary patterns algorithms[J]. Soldagem & Inspeção,2020,25:e2527.