

基于机器视觉的激光智能去除锈蚀的研究

张晓, 王明娣*, 刘金聪, 倪玉吉, 郭敏超, 王贤宝

苏州大学机电工程学院, 江苏 苏州 215137

摘要 针对传统除锈工艺在桥梁养护中的一些问题,进行了激光智能除锈的工艺及设备研究。为实现智能识别工件表面锈迹及除锈,采用 Python 及 OpenCV 视觉库对 16Mn 钢表面锈迹进行识别,通过一系列图像处理算法识别出生锈区域,得到生锈区域的位置信息、生锈等级、尺寸信息等,随后使用 100 W 激光除锈系统对识别出的锈迹进行清除,并对除锈后的工件再次进行识别检测。应用机器视觉辅助的激光去除锈蚀系统后,16Mn 表面 C、O 元素的质量分数下降至 5% 以下。机器视觉辅助下的激光智能除锈可以快速、高效地识别出工件表面的锈蚀,并利用视觉算法和工艺数据库快速匹配相应的加工工艺参数,从而提高了加工效率、降低了人工成本。

关键词 激光技术; 激光除锈; 机器视觉; 锈迹识别; 智能化除锈

中图分类号 TN249

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.0814001

Laser Intelligent Rust Removal Based on Machine Vision

Zhang Xiao, Wang Mingdi*, Liu Jincong, Ni Yuji, Guo Minchao, Wang Xianbao

School of Mechanical and Electric Engineering, Soochow University, Suzhou, Jiangsu 215137, China

Abstract In view of some problems of the traditional rust removal process in bridge maintenance, the laser intelligent rust removal process and equipment are studied in this work. To realize intelligent identification of rust on surfaces of workpieces and rust removal, first, the Python and OpenCV visual library are used to identify the rust on the 16Mn surface. A series of image processing algorithms are used to recognize the rust area, and the position information, rust grade, and size information of the rust area are obtained. Then a 100 W laser rust removal system is used to remove the identified rust, and the derusted workpiece is recognized and detected again. After applying the machine vision-assisted laser rust removal system, the contents of C and O elements on the surface of 16Mn fall below 5%. The laser intelligent rust removal assisted by machine vision can quickly and efficiently identify the rust on the surface of the workpiece. The visual algorithm and process database are used to quickly match the corresponding processing parameters, so as to improve the processing efficiency and reduce the labor cost.

Key words laser technology; laser rust removal; machine vision; rust recognition; intelligent rust removal

OCIS codes 140.3390; 150.0155; 350.3390

1 引言

近年来,激光技术不断蓬勃发展,其应用领域越来越广泛。在桥梁养护方面,激光除锈技术正在逐步取代传统除锈工艺。但目前激光除锈设备均需人工直接操作,不仅效率不高,而且存在一定的安全隐

患,如激光的高强度亮光会损伤工人视力、除锈产生的锈蚀颗粒会对工人健康造成一定的影响等。针对这些问题,本文提出了激光智能去除锈蚀的方法,利用机器视觉检测识别工件表面的锈迹,使用激光除锈设备对识别出的锈迹进行定点清除。

激光除锈是激光表面处理的一种新型清洗技

收稿日期: 2020-07-22; 修回日期: 2020-08-27; 录用日期: 2020-09-23

基金项目: 国家自然科学基金(51675360)、苏州市重点产业技术创新-重点研发产业化项目(SGC201924)、苏州市科技计划项目(SYG201805)

* E-mail: wangmingdi@suda.edu.cn

术,具有非接触式、绿色环保等优点。激光直接作用于锈层下的基底,使基底产生热弹性波,将锈蚀去除可有效避免基底损伤,实现基底表面形态的可控改变^[1-3]。在激光除锈方面,俄罗斯 Kolomenskii 等^[4]提出基底弹性振动波是由压缩波、剪切波和瑞利波组成的,其决定激光清洗效果。Park 等^[5]利用激光清洗系统对桥钢表面的涂层和锈蚀进行去除,并研究了激光功率、脉冲宽度等因素对清洗效果的影响。潘煜等^[6]研究了脉冲激光功率、频率等参数对于钢材表面锈蚀去除的影响,最终实现了清洗等级达到 Sa2.5 的效果。李鑫炎等^[7]研究了激光清洗扫描速度对 16 Mn 钢材表面锈蚀层清洗质量的影响,获得了较好的清洗效果,同时提高了处理后钢材表面的电化学性能。这些研究均采用人工直接除锈的方式,不能做到定点除锈,因而除锈效率不高。

本文研究使用机器视觉的方式识别锈迹,以为激光除锈提供位置和区域信息。在视觉处理方面,众多学者进行了很多的研究。Prabuwono 等^[8]设计了一套流水线上表面信息视觉检测系统,这为视觉检测提供了理论基础。最近,Saravanan^[9]采用机器视觉系统以及适当的算法有效地检测污染物,并实现了污染物的在线清除。田培运^[10]设计了一套激光加工在线检测系统,通过对图像进行图像增强、图像分割、边缘处理等操作,实现了对加工件的高精度在线测量。史天意等^[11]设计了一套用于激光清洗铝合金表面氧化膜的在线检测系统,实现了对激光清洗过程中不同加工区域的准确分割和快速定位。而研究人员对于直接利用机器视觉识别锈迹并自动除锈的研究还有待于进一步深入。

传统激光除锈技术主要是采用人工操作激光除锈软件的方式,其操作流程为:首先根据工件表面锈迹的最长、最宽尺寸在激光除锈软件中绘制矩形或多边形,使其将锈迹区域完全覆盖。然后设置工艺参数,如激光功率、频率、填充方式等,并通过出射激光将表面锈层去除。传统激光除锈技术虽然能获得较好的除锈效果,但仍存在除锈区域不精确、效率低、人工成本高、存在风险、不适用于大规模除锈应用等不足。针对这些不足,以及其无法完全满足工业除锈的智能化、无人化需求的问题,本文对机器视觉检测技术与激光除锈技术的结合进行研究,使用 CCD 工业摄像头以及 OpenCV 开源计算机视觉库搭建了除锈智能化控制系统,对将要除锈的 16 Mn 钢材表面进行图像检测,识别出生锈的区域,确定除锈路径,以实现智能化除锈的目的。

2 实验方法

采用机器视觉识别系统及激光清洗系统进行激光除锈实验。该视觉识别系统由 500 万像素彩色 CCD 工业摄像头、白色环形同轴辅助光源、6 mm 焦距的 FA 镜头组成。激光清洗系统中的激光器为 SPI 脉冲激光器,激光波长为 1064 nm,最大平均输出功率为 100 W,最大单脉冲能量为 1 mJ,激光通过光纤传导,光斑直径为 20 μm ,清洗时激光垂直入射。激光智能去除锈蚀设备如图 1 所示,其结构示意图如图 2 所示,运行逻辑图如图 3 所示。

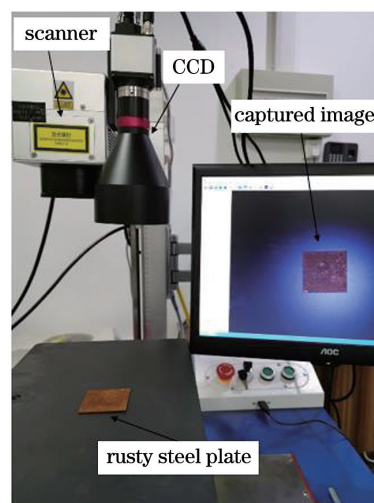


图 1 激光智能去除锈蚀设备

Fig. 1 Laser intelligent rust removal equipment

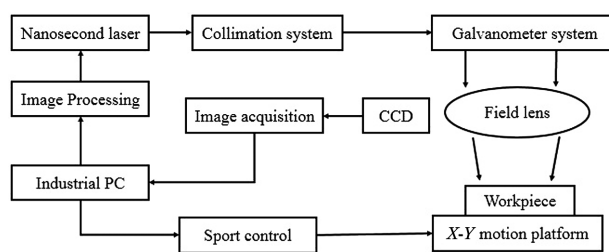


图 2 激光智能去除锈蚀设备的结构示意图

Fig. 2 Structural diagram of laser intelligent rust removal equipment

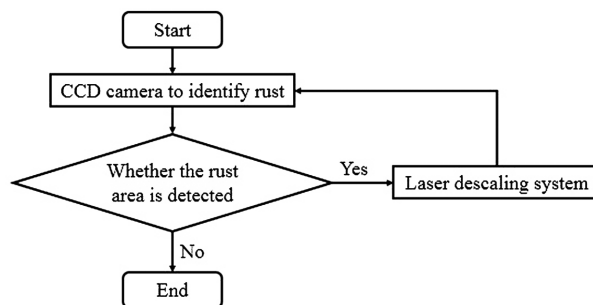


图 3 控制系统逻辑图

Fig. 3 Logic diagram of control system

2.1 锈迹识别算法

利用机器视觉准确地识别出图像中的锈蚀区域,并将锈迹轮廓、尺寸信息传输给后续控制系统,这是本文研究的重点。由于不同金属的锈蚀颜色不同,本文只针对 16Mn 金属表面的锈层进行研究。

2.1.1 图像分割

图像中存在大量的无用信息,为了提高计算机的处理速度,需要将主要识别的物体图像从整体图像中分割出来。阈值分割是一种经典算法,在前景与背景色彩差异较大的情况下表现优异。阈值分割过程中,需选取一个最佳阈值将两者分割成背景图像与目标图像,因此最佳阈值的选择最为关键。

将图像分为目标图像和无用图像,即

$$f(x) = \begin{cases} 255, & t_{\min} < I(x) < t_{\max} \\ 0, & I(x) \leq t_{\min} \& I(x) \geq t_{\max} \end{cases}, \quad (1)$$

式中: $f(x)$ 为图像处理结果,其值为 255 时表示白色像素,其值为 0 时表示黑色像素; $I(x)$ 为像素的 HSV(Hue, Saturation, Value)值; t_{\min} 和 t_{\max} 为最佳阈值的下限与上限。

将 CCD 采集到的 RGB 格式的图像转变为 HSV 格式,以进行图像处理。根据 HSV 值[0, 43, 46]到 HSV 值[115, 255, 255]提取 HSV 颜色模型中的对应色彩区域,该区域即为锈斑所在区域,实验效果如图 4 所示。

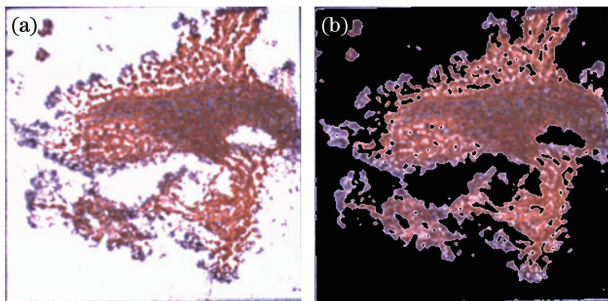


图 4 控制系统逻辑图。(a)原始锈蚀图案;(b)提取对应色彩区域后的图像

Fig. 4 Logic diagram of control system. (a) Original rust pattern; (b) image after extracting corresponding color area

2.1.2 图像膨胀与腐蚀

由图 4 可以看出,从锈蚀部位 HSV 图中提取到的图像内部存在许多的小孔洞,而且这些小孔洞多为不连通区域。如果精确按照每个小孔洞规划清洗路径,加工效率会大打折扣。在激光清洗中,允许激光在一定范围内照射在非锈蚀区域。因此,这里将图案内部小孔洞区域进行填充,使其成为一整块

区域,以提高除锈的效率。

目前使用最多的小孔洞填充算法是膨胀腐蚀算法^[12-13],将与目标图像接触的周围图像融合进目标图像,以填充目标图像中的小孔洞。膨胀算法公式为

$$X = \{x; B(x) \cap E \neq \varphi\}, \quad (2)$$

式中: $B(x)$ 代表膨胀算法的内核; x 为图像 E 中的每一点像素。本文选用 5×5 的膨胀内核,从上至下逐行扫描二值锈迹图像中的全部像素值,使其与膨胀内核做“与”运算。如果膨胀内核和图像的像素值都为 0,该点像素为 0,否则为 1,腐蚀算法则恰恰与膨胀算法相反。通过膨胀腐蚀算法使锈迹图像略微膨胀,填充小孔洞区域并使锈蚀图像尽可能连通。实验效果如图 5 所示。



图 5 图像膨胀与腐蚀

Fig. 5 Dilation and corrosion of image

2.1.3 绘制轮廓

本文通过使用 OpenCV 库中的 `cv2.drawContours()` 函数来绘制图中白色区域的外部轮廓,得到一块较大的整体生锈区域,该区域包含尺寸信息、轮廓信息、位置信息等,供激光除锈使用。本文选择绘制全部轮廓,轮廓宽度为 3,如图 6 所示。经过测定,识别的锈迹面积大于实际锈迹面积的 95%,满足实验的要求。



图 6 轮廓填充

Fig. 6 Outline filling

2.2 激光振镜的运动控制

要使激光在图 6 中的锈蚀区域工作,需要精确控制二维扫描振镜的运动。扫描振镜是两个互相垂直的电机(分别位于 X、Y 方向),两个电机互相配合可以实现 100 mm × 100 mm 范围内的任意图案扫描,如图 7 所示。

采用智能化控制系统提取图像中的锈蚀区域,得到其像素信息,经坐标转换将像素信息转换为 X-Y 二维振镜的控制数据,然后经数模(D/A)转换将控制数据转换为模拟量信号,采用直线插补法控制二维振镜,完成除锈动作。系统同时从工艺数据库中提取激光加工参数,包含激光功率、频率、扫描速度、扫描线间距等参数,控制激光器按要求工作,并配合二维振镜完成图形的扫描工作。

2.3 实验过程

本文中用于激光清洗的工件均为 16Mn 钢板,

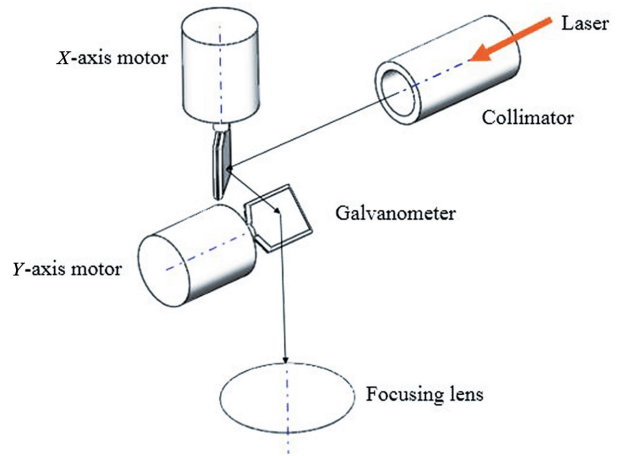


图 7 二维振镜示意图

Fig. 7 Diagram of two-dimensional galvanometer

尺寸为 50 mm × 50 mm × 1 mm,表面锈迹图像及 Fe、C、O 元素的质量分数如图 8 所示,图中 CPS 为计数率。

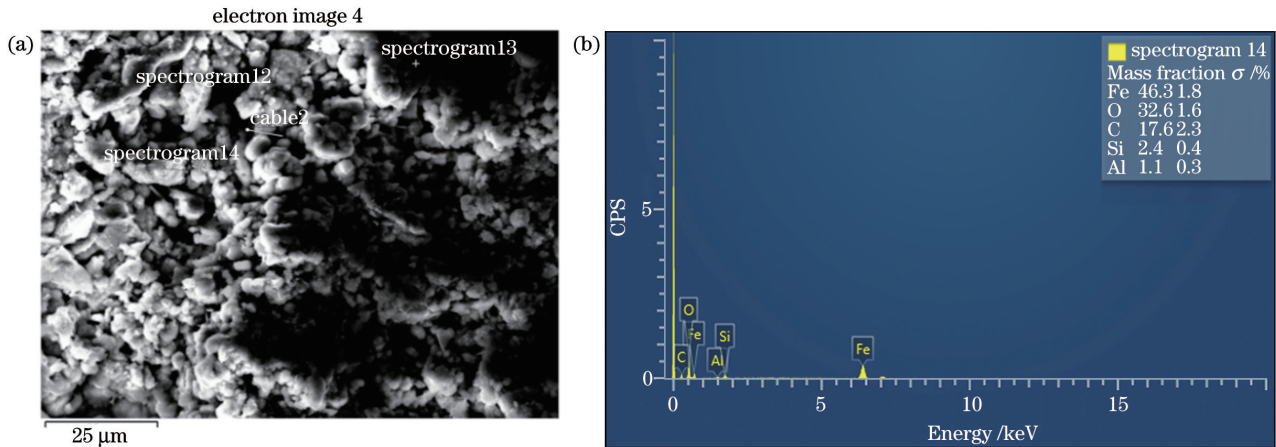


图 8 表面锈迹微观图像及主要元素质量分数。(a)表面锈迹微观图像;(b)主要元素质量分数

Fig. 8 Microscopic image of surface rust and mass fraction of main elements. (a) Microscopic image of surface rust; (b) mass fraction of main elements

图9为需要除锈的4块钢板样品,从图中可以

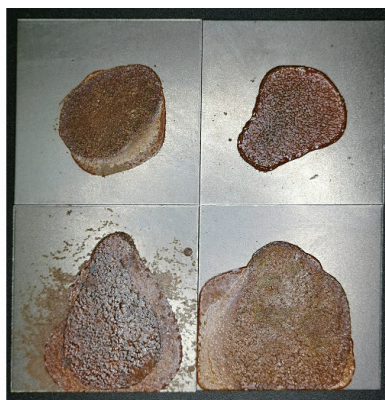


图 9 待清洗样品表面图案

Fig. 9 Surface patterns of sample to be cleaned

看出,它们锈蚀区域的轮廓各不相同,位置也各不相同。使用传统激光除锈工艺时需要绘制整个矩形,并对所有区域进行除锈,高功率除锈时不仅容易损伤未生锈区域的材料性能,而且降低了除锈效率。为了验证激光除锈控制系统的可行性,使用机器视觉识别这 4 块钢板得到其锈蚀信息,用于激光除锈。

将机器视觉检测的结果导入激光除锈软件,如图 10 所示,黑色区域为锈蚀区域。对比实际锈蚀的钢板,发现图像中的锈蚀区域基本覆盖 4 块钢板上的全部锈蚀,由于算法中未考虑其他污染物,因此本次识别忽略了左下钢板锈迹附近的油污。

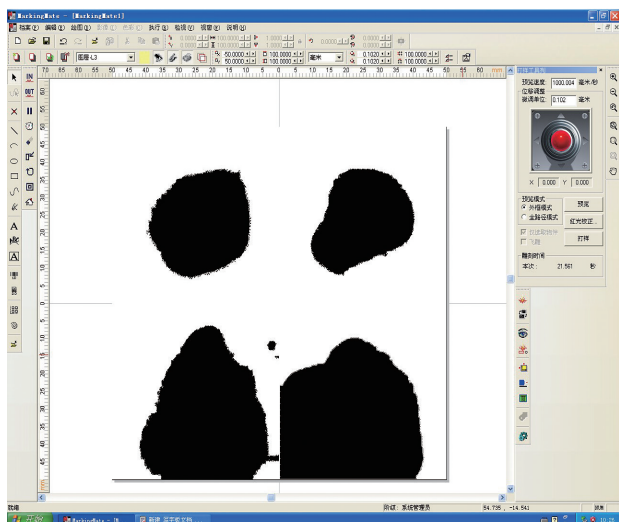


图 10 导入清洗软件后的加工图形

Fig. 10 Processing graph processed by cleaning software

3 分析与讨论

图 11 是激光除锈后的宏观图像,从图中可以看出,表面锈蚀基本被清理干净、露出金属光泽,但与未除锈区域的金属光泽略有不同,两块区域存在界线,这是因为除锈区域吸收了激光能量,在基体表面生成了一层纳米结晶层,从而延长了再次生锈的时间。在环形辅助光源的照射下,未生锈区域和除锈区域均呈现亮白色。对相机采集的除锈后的图片进行图像处理,并将轮廓填充为纯黑色,检测结果中没有白色填充,可认为表面无锈迹残留。

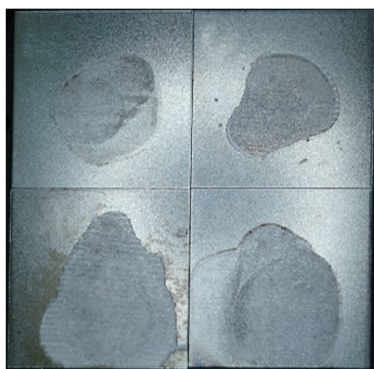


图 11 除锈后的钢板

Fig. 11 Derusted steel plates

除锈后表面质量的好坏是检测激光除锈是否符合除锈标准的一个重要因素^[14]。为了判断激光除锈后是否还有锈迹残留,采用 X 射线能量散射谱仪检测除锈表面 Fe、C、O 元素的质量分数,除锈后 4 块钢板表面的各元素质量分数如图 12、表 1 所示。

激光干式除锈的主要机理为相爆炸^[15],当激光

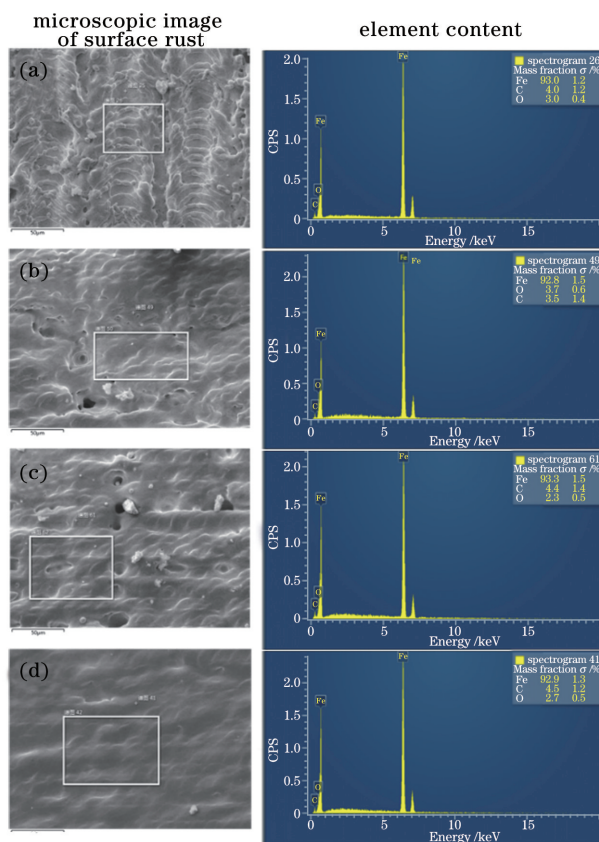


图 12 除锈后样品表面形貌和各元素质量分数。

(a)样品 1;(b)样品 2;(c)样品 3;(d)样品 4

Fig. 12 Surface morphologies and mass fractions of samples after rust removal. (a) Sample 1;

(b) sample 2; (c) sample 3; (d) sample 4

能量密度超过表层锈层的烧蚀阈值进而超过锈层的光击穿阈值时,锈层被激光电离产生密集的等离子体,等离子体膨胀产生冲击波,强劲的冲击波压缩下层锈蚀,同样的下层锈蚀也会产生强劲的反作用力,使上层锈蚀与下层锈蚀脱离^[16-17]。

表 1 除锈前后各元素质量分数

Table 1 Mass fraction of each element before and after

Condition	rust removal			%
	Fe	C	O	
Before rust removal	49	17.6	32.6	
After rust removal	93	4.1	2.8	

在激光除锈过程中,大部分上层锈蚀脱落,小部分下层锈蚀被压缩在基底表面,钢表面硬度略微上升。因此从图 12 的扫描电子显微镜(SEM)和 X 衍射图谱分析(EDS)图像中可以看出,未除锈之前,锈迹表面 O 元素的质量分数为 32.6%,经过激光除锈后,锈迹表面 O 元素的质量分数下降为 3%左右。光化学烧蚀机制破坏了碳原子之间的 C—C 键组

合, C 元素的质量分数略微下降, 从 17.6% 下降为 4% 左右, 这说明了该除锈系统能够将表面锈蚀去除。

同时, 根据图 11 除锈后钢板的图像, 纳米晶图案只存在于绘制图案处, 且图案轮廓形状与绘制轮廓相同。同时, 除锈后钢板表面无锈迹残留, 这说明所设计的振镜控制系统能够实现对表面锈迹的定点清除。相比于人工绘制矩形的激光清洗方式, 采用机器视觉辅助的智能除锈方案大约减小了 30% 的清洗面积, 在激光扫描速度和扫描线间距相同的条件下, 加工效率得到 30% 的提升。

与手持式清洗机相比, 采用机器视觉辅助的清洗方式的加工时间更少。采用视觉识别的方式, 直接绘制出了生锈区域的轮廓图案(图 10), 实现了锈迹轮廓的准确识别, 该过程无需对整块区域进行清洗。这一加工方式能够实现锈迹识别、加工轮廓绘制、参数设置与优化和振镜控制等一系列加工过程的自动化, 减少了人工的参与, 从而提升了整个清洗过程的效率和效果。

4 结 论

通过对激光智能去除 16Mn 合金钢表面的锈蚀进行研究, 验证了机器视觉识别锈迹并自动除锈的实际可行性, 得出以下结论:

1) 利用锈迹识别算法能够很好地识别工件表面的锈迹, 得到完整的锈蚀区域信息, 在除锈完毕后, 图像识别算法还可作为检测手段检测除锈是否干净;

2) 采用优化后的激光参数可将视觉识别出的锈迹完全清除, 清洗后表面的氧的平均质量分数下降到 3% 以下, 铁的平均质量分数从 49% 上升至 93%, 因此通过清洗得到了较好的除锈效果。

3) 采用机器视觉可以识别出钢材表面 95% 以上的锈迹, 通过将图像数据转化为振镜控制数据, 可精准地去除识别出的锈迹, 该过程不需要人工绘制工作区域以及设定工作参数, 清洗效率得到了约 30% 的提升。

参 考 文 献

- [1] Yang M K, Zhou F R, Ma Y, et al. Laser rust removing process of deep rusting steel plate [J]. Applied Laser, 2018, 38(6): 975-980.
杨明昆, 周仿荣, 马仪, 等. 深度锈蚀钢板的激光除锈工艺研究[J]. 应用激光, 2018, 38(6): 975-980.
- [2] Xie Y F, Liu H W, Hu Y X. Determining process parameters for laser derusting of ship steel plates[J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(4): 0403008.
解宇飞, 刘洪伟, 胡永祥. 船舶板材激光除锈工艺参数确定方法研究[J]. 中国激光, 2016, 43(4): 0403008.
- [3] Yang M K, Zhou F R, Ma Y, et al. Laser derusting technology and its application [J]. Cleaning World, 2018, 34(10): 37-42.
杨明昆, 周仿荣, 马仪, 等. 激光除锈技术及其发展现状[J]. 清洗世界, 2018, 34(10): 37-42.
- [4] Kolomenskii A A, Kaya N, Kaya G, et al. Manifestations of induced molecular alignment in the interaction of ultrafast laser pulses with gases [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2017, 826: 012001.
- [5] Park J E, Kyung K S, Moon M G, et al. Applicability evaluation of clean laser system in surface preparation on steel [J]. International Journal of Steel Structures, 2020, 20(6): 1882-1890.
- [6] Pan Y, Wang M D, Liu J C, et al. Process and mechanism of HT200 laser de-rusting for 100 W fiber laser [J]. Applied Laser, 2019, 39(2): 269-274.
潘煜, 王明娣, 刘金聪, 等. 100 W 脉冲激光器 HT200 表面激光除锈工艺及机理研究[J]. 应用激光, 2019, 39(2): 269-274.
- [7] Li X Y, Li C Y, Wang D, et al. Effect of laser scanning speeds on cleaning quality of rusted layer on Q345 steel surface [J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(10): 1002010.
李鑫炎, 李灿阳, 王丹, 等. 激光扫描速度对 Q345 钢表面锈层清洗质量的影响[J]. 中国激光, 2020, 47(10): 1002010.
- [8] Prabuwno A S, Sulaiman R, Hamdan A R, et al. Development of intelligent visual inspection system (IVIS) for bottling machine [C] // TENCON 2006-2006 IEEE Region 10 Conference, November 14-17, 2006, Hong Kong, China. New York: IEEE Press, 2006: 1-4.
- [9] Saravanan D. Machine vision for detection contaminations technique of cotton [J]. Man-Made Textiles in India, 2019, 47(12): 409-413.
- [10] Tian P Y. Design of on-line dimension detection system for laser machining based on machine vision [J]. Agricultural Equipment & Vehicle Engineering, 2019, 57(10): 97-100.
田培运. 基于机器视觉的激光加工在线检测系统设计[J]. 农业装备与车辆工程, 2019, 57(10): 97-100.
- [11] Shi T Y, Zhou L Z, Wang C M, et al. Machine vision-based real-time monitor system for laser cleaning aluminum alloy [J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(4): 0402007.

- 史天意, 周龙早, 王春明, 等. 基于机器视觉的铝合金激光清洗实时检测系统[J]. 中国激光, 2019, 46(4): 0402007.
- [12] Du H M, Jiang B B, Chang L B, et al. Improvement and parallel implementation of dilation and erosion algorithms[J]. Journal of Xi'an University of Posts and Telecommunications, 2017, 22(1): 88-93.
杜慧敏, 蒋怵怵, 常立博, 等. 膨胀与腐蚀算法的改进及并行实现[J]. 西安邮电大学学报, 2017, 22(1): 88-93.
- [13] Deng S C, Huang Y. Fast algorithm of dilation and erosion for binary image[J]. Computer Engineering and Applications, 2017, 53(5): 207-211.
邓仕超, 黄寅. 二值图像膨胀腐蚀的快速算法[J]. 计算机工程与应用, 2017, 53(5): 207-211.
- [14] Lei Z L, Sun H R, Chen Y B, et al. Elimination of rusting layer from high-strength steel surface using different laser cleaning methods[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(7): 0702003.
雷正龙, 孙浩然, 陈彦宾, 等. 不同激光清洗方法对高强钢表面锈蚀层的去除研究[J]. 中国激光, 2019, 46(7): 0702003.
- [15] Zou W F, Yin Z. The theoretical cleaning model of paint removal by short pulse laser[J]. Journal of Gannan Normal University, 2008, 29(6): 27-30.
邹万芳, 尹真. 短脉宽激光除漆理论清洗模型的建立[J]. 赣南师范学院学报, 2008, 29(6): 27-30.
- [16] Antonopoulou-Athera N, Kalathakis C, Chatzitheodoridis E, et al. Theoretical and experimental approach on laser cleaning of coins[J]. SN Applied Sciences, 2019, 1(3): 1-12.
- [17] Li W. Mechanism research and equipment development of laser cleaning corrosion[D]. Tianjin: Nankai University, 2014: 18-24.
李伟. 激光清洗锈蚀的机制研究和设备开发[D]. 天津: 南开大学, 2014: 18-24.