

基于 Retinex 去雾算法的水射流辅助激光加工特征图像融合算法

李英^{1,2*}, 李欣玥^{1,2}, 王佳琦^{2**}, 许金凯², 于化东^{2,3}

¹长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022;

²长春理工大学跨尺度微纳制造教育部重点实验室, 吉林 长春 130022;

³吉林大学机械与航空航天工程学院, 吉林 长春 130025

摘要 为了在水射流辅助激光加工过程中更加高效地观测工件表面的结构特征, 本文提出了一种基于 Retinex 去雾算法的水射流辅助激光加工图像融合算法。首先, 利用基于形态学理论的自适应性 Retinex 去雾算法解决水射流导致的气泡和表面模糊问题。通过图像区块的标准差值计算细节指数, 确定高斯滤波函数的尺度, 并计算单尺度函数线性叠加的权重。其次, 采用离散小波变换分解聚焦区域不同的源图像序列, 并根据人眼视觉原理拉伸细节分量。最后利用离散小波逆变换将分量重新融合, 得到可以增强细节信息的全聚焦图像。当水射流喷嘴直径为 0.4 mm 时, 算法处理后的图像的标准差、平均梯度和空间频率分别可以达到参考图像的 95.41%、71.88% 和 67.29%; 当射流倾斜角为 45° 时, 上述三个指标分别达到了参考图像的 90.59%、72.69% 和 94.50%。这表明本文所提算法有效提升了图像质量, 对于在不同加工情况下获得的图像均可实现较好的处理效果, 同时有助于提高加工效率。

关键词 图像处理; 水射流辅助激光加工; Retinex 去雾算法; 离散小波变换; 图像融合

中图分类号 TP751

文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL230985

1 引言

水射流辅助激光加工技术, 作为激光加工发展的一个全新方向, 可以有效缓解激光加工对材料的热损伤, 因而在微细加工方面具有广阔的应用前景^[1]。为了及时获取工件的加工状态并观测其加工特征, 需要引入显微系统对加工过程中的材料表面进行观察。对于激光直接在样件表面烧蚀来说, 热影响区较大, 容易发生熔融物冷凝堆积, 同时还会造成明显的热效应^[2]。水射流可以快速地烧蚀产物排出, 同时减缓热影响区的产生。但是水射流会削弱图像呈现的细节, 降低采集图像的质量; 同时, 由于放大倍率高导致景深受限, 只有在景深范围内的薄层才能够清晰成像^[3]。为了使采集的显微图像更好地反映材料的细节特征和加工特征, 如何排除水射流干扰以及如何获得全聚焦图像的难题亟须解决。

在水下图像去雾方面, 部分研究人员以去雾为目的进行图像增强或复原, 他们经常通过图像处理技术强调图像局部区域的亮度、饱和度和纹理特征等措施来提高图像的对比特度, 最后达到去雾的目的。Wu 等^[4]对图像中的非天空区域进行自适应直方图

均衡化处理, 得到了在颜色和亮度上都更符合人类视觉感知的图像。Huang 等^[5]提出了一种结合多尺度 Retinex 算法与对比度限制自适应直方图均衡化算法的方法, 该方法在图像去雾和色彩恢复等方面具有较好的效果。张云涛等^[6]为解决水下场景中图像对比度低、偏蓝绿色严重的现象, 提出了一种基于图像分割和色适应变换白平衡的图像增强算法。他们将基于图像三通道反转去雾的低照度增强方法应用于水下图像的处理, 得到了优于经典算法的结果。Yue 等^[7]采用暗通道先验模型对图像的低频子带进行处理, 之后采用逆双树复小波变换得到了去雾图像。然而, 从有雾图像本身出发的方法没有考虑到局部区域的处理方式会导致细节信息丢失、对比度过度增强等问题^[8], 因此需要寻求针对不同图像的局部区域图像去雾的方法。

为了寻求有效的拓展景深的方法, 研究人员提出了许多方法, 如: 将球差引入显微镜头设计中^[9], 改变显微镜的出瞳函数形式^[10], 但这些方法获取的景深有限; 通过扫描成像技术^[11]、衍射光技术^[12]、波前编码技术^[13-14]来提高显微景深, 但这样做会出现效率降低、设备体积过大和横向分辨率过低等问题。随着数字图像

收稿日期: 2023-07-03; 修回日期: 2023-08-11; 录用日期: 2023-08-21; 网络首发日期: 2023-09-07

基金项目: 国家自然科学基金(U19A20103)、高等学校学科创新引智“111”计划(D17017)

通信作者: *gdly@cust.edu.cn; **wjqand@126.com

处理方法的发展,多聚焦图像融合弥补了显微物镜焦深范围有限导致的不能清晰采样大幅图像的不足,在医学图像处理^[15]、视觉功率巡检^[16]、遥感^[17]和可见光与红外图像^[18]等方面得到了广泛应用。多聚焦图像融合大体上可以分为基于空间域、变换域和深度学习的融合算法,其中基于变换域的融合算法得到了长足发展。

基于变换域的融合算法以变换映射的方式将源图像特征以多尺度变换的方式映射到频域,然后将分析所得到的频谱特征进行融合;但大部分的变换方式具有较高的计算复杂度,尤其是在高频子图像的各种向上分解中会产生大量冗余数据^[19]。这些方法大多不完善,因此,应该选择合适的变换算法来平衡融合质量和计算复杂度,以满足实际应用的要求^[20]。

本文提出了一种离散小波变换和人眼视觉原理结合的图像融合算法。根据水射流辅助激光加工的特点,对源图像进行图像融合处理,使显微系统采集的图像在水射流干扰下更好地展现材料表面形貌及加工特征。所提算法有效解决了图像多尺度变换融合中计算复杂的问题,同时增强了源图像的细节信息,提升了融合质量,进而使得研究人员可以通过显微系统获得水射流辅助激光加工表面的全聚焦图像。

2 水射流辅助激光加工表面图像处理方法

2.1 形态学理论的自适应性 Retinex 去雾

加工过程中利用水射流辅助是为了及时去除激光加工产生的材料碎屑和熔融物,减少热影响区。尽管加工过程中会力求水射流稳定,但水射流的引入仍会大大降低采集图像的质量,主要表现为图像表面存在由水射流带来的微小气泡或者图像表面模糊不清。因此,笔者利用基于形态学理论的 Retinex 去雾算法来去除水射流的干扰。

根据气泡与样件表面灰度值的不同进行前景分割,即:在图像中确定分割阈值 T_h ,并将其与图像中每个像素的灰度值进行对比,进而实现图像的分割。分割处理后的二值化图像的表达式为

$$g(x, y) = \begin{cases} 1, & f(x, y) > T_h \\ 0, & f(x, y) \leq T_h \end{cases}, \quad (1)$$

式中: $f(x, y)$ 为原图像的灰度值。其中, T_h 的取值参照灰度直方图峰谷法确定^[21]。

为了在去除气泡的过程中有效保护图像的细节信息,利用形态学腐蚀理论对前景分割中提取到的气泡区域进行处理^[22]。膨胀或腐蚀算法可以理解为圆盘形结构 B 在图像 A 中移送并进行一种类似卷积操作的处理,其表达式为

$$A \oplus B = \{z | (B)_z \cap A \neq \emptyset\}. \quad (2)$$

$A \oplus B$ 表示 A 被 B 膨胀。 A 被 B 膨胀即为所有结构元素原点位置组成的集合,其中映射平移后的 B 至少与

A 的某些部分重叠。分割后的气泡图像经过形态学处理后被有效平滑,在原图上达到了很好的模糊效果。同时,为了使采集的样件表面的图像质量更好,在形态学处理气泡的同时引入去雾算法,如此可使后续处理图像呈现更好的效果。

物体本身是没有颜色的,人眼所感知到的周围物体的颜色是因为不同波长的光反射到了人眼中。当人眼在看到周围物体的颜色时,视网膜可以感知到亮度和色彩,大脑皮层可以形成视觉,这两者组成了视网膜皮层理论,即 Retinex 理论。该理论认为任何图像都是由照射分量和反射分量相乘得到的,可以表示为

$$I(x, y) = R(x, y) \times L(x, y), \quad (3)$$

式中: $I(x, y)$ 为 CCD 相机采集到的样件表面图像; $R(x, y)$ 为样件表面信息的反射分量; $L(x, y)$ 为周围环境的照射分量。对式(3)两边取对数后可以理解为对数域中图像的反射分量由源图像信号减去周围环境的照射分量得到,即

$$\lg[R(x, y)] = \lg[I(x, y)] - \lg[L(x, y)]. \quad (4)$$

众多学者进行验证后认为,基于中心环绕的 Retinex 算法可以使图像呈现得更加自然而且能更准确地估算出自然光照信息。其思想为:像素点的亮度可由其周围环绕像素来估计,环绕像素的权重由环绕函数确定^[23]。单尺度 Retinex 算法利用高斯滤波估计照射分量 $L(x, y)$,即用高斯函数 $G(x, y)$ 与原始图像 $I(x, y)$ 进行卷积:

$$L(x, y) = G(x, y) * I(x, y). \quad (5)$$

式(5)中的高斯滤波函数应使用低通滤波函数。通过卷积可以得到图像周围环境的照射分量,用其估计源图像的低频分量,然后用源图像照射分量减去低频分量便可得到图像的高频分量。具体过程为

$$\begin{aligned} \lg[R_i(x, y)] &= \lg[I_i(x, y)] - \lg[L_i(x, y)] = \\ &= \lg[I_i(x, y)] - \lg[G(x, y) * I_i(x, y)] = \\ &= \lg\left[\frac{I_i(x, y)}{G(x, y) * I_i(x, y)}\right], \end{aligned} \quad (6)$$

式中: $i \in \{R, G, B\}$,代表图像的第 i 个通道;高斯函数 $G(x, y)$ 的表达式为

$$G(x, y, \sigma) = K \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2}\right), \quad (7)$$

其中 σ 为中心环绕函数的尺度参数,它决定了经过高斯滤波处理后的图像的平滑程度。较小的 σ 会导致图像存在一定程度的失真,而过大的 σ 会导致图像丢失部分细节。针对 σ 的取值问题,研究人员提出了多尺度 Retinex 算法。其主要思路就是采用单尺度 Retinex 算法对源图像进行处理后线性叠加,即

$$\lg[R_i(x, y)] = \sum_{i=1}^k \omega_k \left\{ \lg[I_i(x, y)] - \lg[G_k(x, y) * I_i(x, y)] \right\}, \quad (8)$$

式中: ω_k 为权重; k 为尺度个数。根据文献[24], 当高斯滤波器的尺度分别设置为 15、80 和 250 时, 多尺度 Retinex 算法可以获得更好的处理结果。

由于图像的不同部分包含的细节信息具有一定差异, 因此可以根据图像中细节的丰富程度划分不同的区域[25]。将源图像 S 以 10 个像素为步长划分为 N 个区块 S_N , 且区块之间的关系为

$$S = \bigcup_{n=1}^N S_N. \quad (9)$$

为了区分细节丰富块和细节稀少块, 可以定义区块的细节指数为

$$\varphi_N = \text{arccot}(D_N), \quad (10)$$

式中: D_N 为区块 S_N 的标准差。标准差偏小代表该区块的像素值波动较小, 细节信息较少。基于以上理论, 可以根据细节指数确定每个区块最合适的高斯滤波函数尺度, 即

$$\sigma_N = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{\varphi_{\max} - \varphi_{\min}} (\varphi_N - \varphi_{\min}) + \sigma_{\min}, \quad (11)$$

式中: φ_{\min} 和 φ_{\max} 分别表示区块细节指数的最小值和最大值, 并且 $\sigma_{\min} = 15$, $\sigma_{\max} = 250$ [24]。多尺度 Retinex 算法中不同尺度的权重的计算公式为

$$\omega_k^N = \frac{\sum_{i=1, i \neq k}^3 |\sigma_N - \sigma_i|^2}{2 \sum_{i=1}^3 |\sigma_N - \sigma_i|^2}, \quad k = 1, 2, 3. \quad (12)$$

对源图像进行去雾处理可以减少加工过程中水射流的干扰, 改善视觉效果。但是由于显微系统的景深限制, 源图像序列均为不同层面的聚焦图像, 对源图像进行融合就可以得到全聚焦的样件表面图像。

2.2 离散小波变换图像融合

离散小波变换常用于图像信号的处理。不同于连续小波变换, 离散小波变换将尺度因子和平移因子进行了离散化处理, 并根据一定的采样间隔对信号序列进行下采样[26]。源信号通过离散小波变换后分解为近似部分 B_1 和细节部分 D_1 , 然后将近似部分 B_1 进一步分解, 由此可以得到任意尺度的近似部分和细节部分[27]。在采用小波变换对图像进行融合处理时, 将图像看成是一个二维信号, 分别对图像的行和列进行下采样, 最后可得到一组低频分量和三组高频分量。低频分量表示图像的近似信息, 即源图像的低分辨率图像, 而高频分量表示图像水平、竖直、对角方向的细节信息[28], 即

$$B_r(x, y) = \sum_m \sum_n h(2m-x)h(2n-y)B_{r-1}(m, n), \quad (13)$$

$$D_r^H(x, y) = \sum_m \sum_n h(2m-x)g(2n-y)B_{r-1}(m, n), \quad (14)$$

$$D_r^V(x, y) = \sum_m \sum_n g(2m-x)h(2n-y)B_{r-1}(m, n), \quad (15)$$

$$D_r^D(x, y) = \sum_m \sum_n g(2m-x)g(2n-y)B_{r-1}(m, n), \quad (16)$$

式中: $g(x)$ 表示高通滤波器; $h(x)$ 表示低通滤波器。图像经过二维小波变换后分成低频分量 B 、水平高频分量 D^H 、垂直高频分量 D^V 和对角高频分量 D^D 。通过小波变换对图像进行 a 层分解, 最终会得到 $3a+1$ 个不相同的频带, 其中包括一个低频分量 (LL_j) 和 $3a$ 个高频分量 (LH_j, HL_j, HH_j), 其中 j 代表小波分解的层数, $j \in \mathbb{N}^*$ 。

图像融合的质量往往取决于图像是否能清晰地呈现细节。笔者基于人类视觉原理对高频分量进行拉伸, 以突出图像的细节信息。根据德国生理学家韦伯提出的理论, 人眼可以感受到与背景成正比的刺激[29], 即

$$\frac{\Delta I_{\min}}{I} = k_0. \quad (17)$$

其中, k 为韦伯比, 其在一个较大的范围内可以被看作是常数, 即: 当 I 改变时, $\Delta I_{\min}/I$ 基本保持不变。研究发现, 基于韦伯定律的差异激励特征能够很好地对图像进行表达[30], 表达式为

$$\xi(x_c) = \arctan \left[\alpha \cdot \frac{\sum_{b=0}^{P-1} (x_b - x_c)}{\max(I) - \min(I)} \right], \quad (18)$$

式中: x_c 为当前像素点的灰度值; x_b 为相邻像素点的灰度值; P 为相邻像素点的个数; α 是为防止反正切函数变化过快而引入的一个参数。

当细节处于黑暗区域时, 应对其进行小幅拉伸; 当细节处于明亮区域时, 应对其进行较大幅度的拉伸。在小波变换中, 低频层可以提供细节背景的明亮程度。因此, 细节层的拉伸函数为

$$I_{D,p} = I_D^\lambda \cdot I_B, \quad (19)$$

式中: λ 决定细节的放大程度, $\lambda \leq 1$; I_B 表示低频层; $I_{D,p}$ 和 I_D 表示原始的高频层和拉伸后的高频层。为了避免对黑暗区域的拉伸程度过小, 将式(19)中的 I_B 设置为最小值。根据文献[31], $\lambda \in (0.8, 0.9)$ 可以得到满意的结果, 但是本文所处理的显微灰度图像需要还原的细节信息更加精细, 所以需要重新确定 λ 值。经过实验发现, 当 $\lambda \leq 0.3$ 时可以观察到处理后的图像的明显变化。但是取值过小会导致图像的灰度值变大, 影响最后的视觉效果。因此, 本文取 $\lambda = 0.1$ 。将低频层和高频层进行线性组合, 以生成增强结果。对三个高频分量进行拉伸, 表达式为

$$I_{HL,EN} = I_{LL} + \eta \cdot (I_{HL}^\lambda \cdot I_{LL}), \quad (20)$$

$$I_{LH,EN} = I_{LL} + \eta \cdot (I_{LH}^\lambda \cdot I_{LL}), \quad (21)$$

$$I_{HH,EN} = I_{LL} + \eta \cdot (I_{HH}^\lambda \cdot I_{LL}), \quad (22)$$

式中: I_{LL} 、 I_{HL} 、 I_{LH} 、 I_{HH} 分别表示近似信息、水平细节信息、竖直细节信息和对角细节信息; $I_{HL,EN}$ 、 $I_{LH,EN}$ 、 $I_{HH,EN}$ 表示进行基于人眼视觉基础拉伸后的水平、竖直和对角细节信息; η 为系数。

本文所提融合算法的流程如图 1 所示。

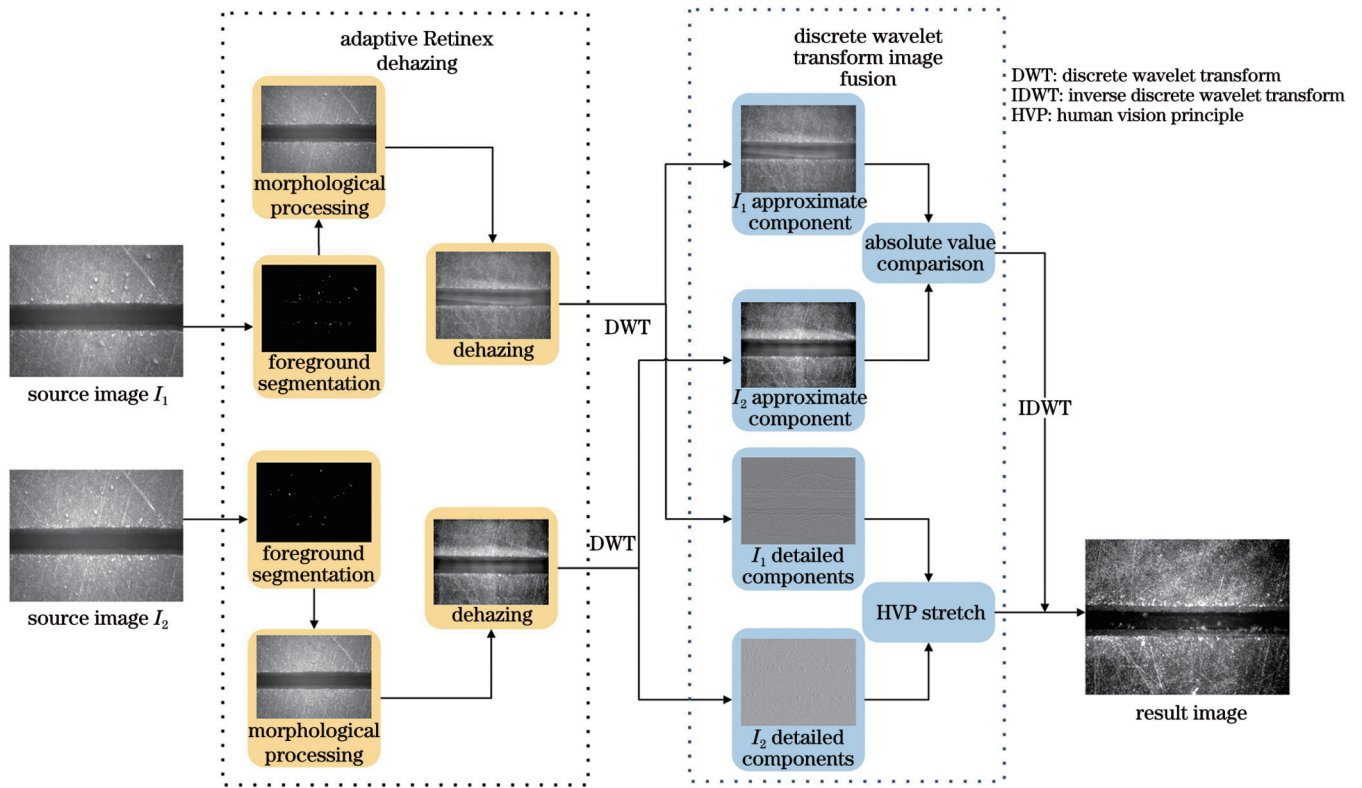


图 1 融合算法流程图

Fig. 1 Flow chart of fusion algorithm

3 实验与结果

采用 CCD 拍摄激光干加工和水射流辅助激光加工时的微槽图像, 根据上文算法对源图像进行处理。同时, 根据喷嘴直径和射流倾斜角对材料表面流动水层的影响, 讨论不同状态的水射流对采集图像的影响以及最终的处理效果。本文采用标准差(SD)、平均梯度(AG)和空间频率(SF)这三种评估指标对图像的质量进行量化评估^[32-33]。

3.1 实验设置

搭建的实验系统如图 2 所示, 该系统主要由激光

加工和图像采集系统以及水射流辅助系统组成。激光加工和图像采集系统集合了激光器、水射流喷嘴和 CCD 相机。激光器的脉宽、波长和光斑直径分别为 100 ns、1064 nm 和 48 μm。激光依次经过反射镜、扩束镜和聚焦透镜后作用在工件表面。工件固定在可蓄水容器平台上, 利用 CCD 相机配合放大镜头采集钛合金材料(TC11)的表面图像。实验选用的 CCD 相机是德国的 ATV Guppy Pro 系列相机, 型号为 F-095C 1394b。放大镜头购于深圳市海约电子有限公司, 型号为 HY-180XA, 其配有 2 倍辅助物镜, 拍摄放大倍数为 170 倍。水射流辅助系统通过压强差将液体以水射流

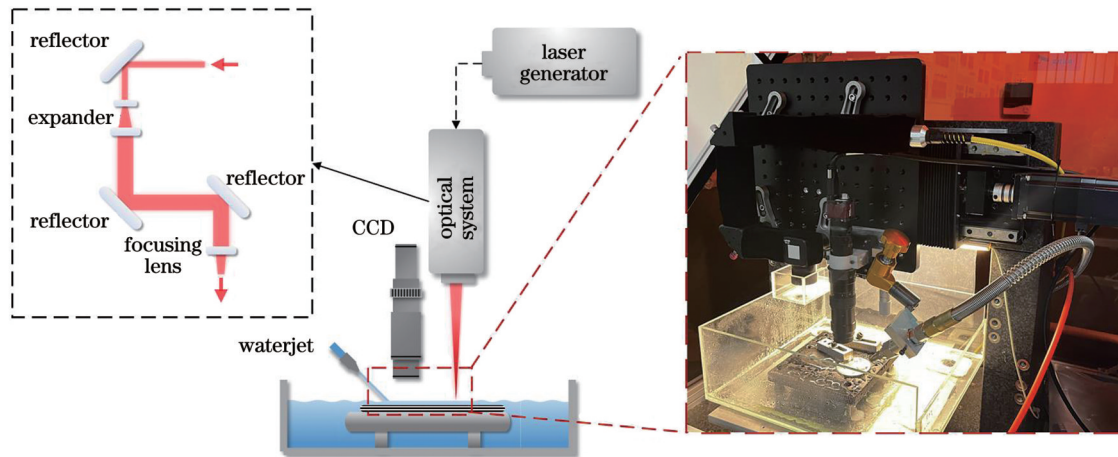


图 2 水射流辅助激光加工装置

Fig. 2 Waterjet-assisted laser processing experimental setup

的形式喷射在材料表面,形成流动的水层。

根据其他研究者的实验结果,水射流的参数会影响覆盖在工件表面的水的特性^[34]。水层的厚度(h)是指水层上表面到工件表面的距离。水射流喷嘴直径

和水射流倾斜角可以影响流动水层的状态,即:喷嘴直径越大,倾斜角越小,流动水层越厚。流动水层会影响采集的源图像的质量,水层越厚,图像的质量越差,如图 3 所示。

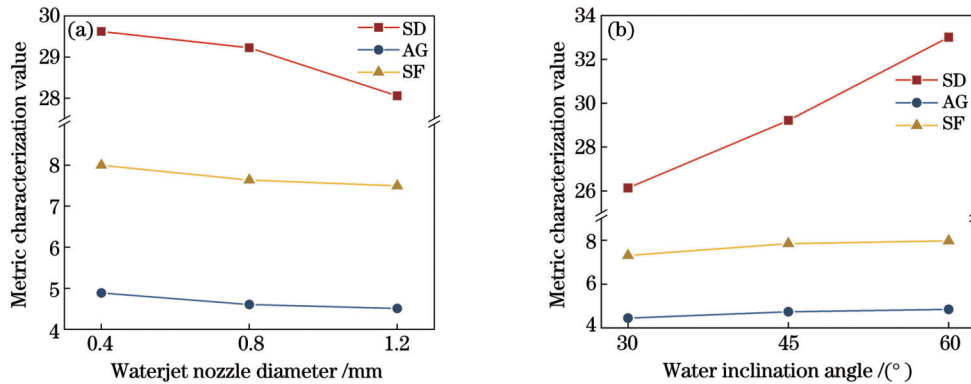


图 3 不同参数下源图像的质量对比。(a)水射流喷嘴直径;(b)水射流倾斜角

Fig. 3 Quality comparison of source images under different parameters. (a) Waterjet nozzle diameter; (b) waterjet inclination angle

为了验证所提算法的普适性,选取不同的水射流系统压强值以及不同的喷嘴直径进行对比实验,实验参数如表 1 所示。

表 1 水射流辅助系统参数

Table 1 Parameters of waterjet-assisted system

Parameter	Value
Waterjet offset distance /mm	6
Nozzle stand-off distance /mm	6
Water pressure /MPa	0.4
Waterjet nozzle diameter /mm	0.4, 0.8, 1.2
Waterjet inclination angle /(^{\circ})	30, 45, 60

3.2 空气环境与水射流环境下源图像的处理

根据上文表述,水射流会降低所采集的样品表面图像的质量,具体表现为微小气泡遮挡表面细节[如图 4(a)所示]或者表面模糊不清[如图 4(b)所示]。

处理后的样品表面图像如图 5 所示,图 5(a)、(b)分别为水射流环境下获取的一张源图像及其最终处理后的结果。可以看到,在处理后的图像中,气泡对图像信息的干扰已经被淡化,并且还还原了更多的细节特征。表 2 给出了图 5 中两幅图像的质量评估结果,可见:与源图像相比,处理后的图像的 AG 提高了 27.6%,SD 提高了 20.0%,SF 提高了 4.74%。

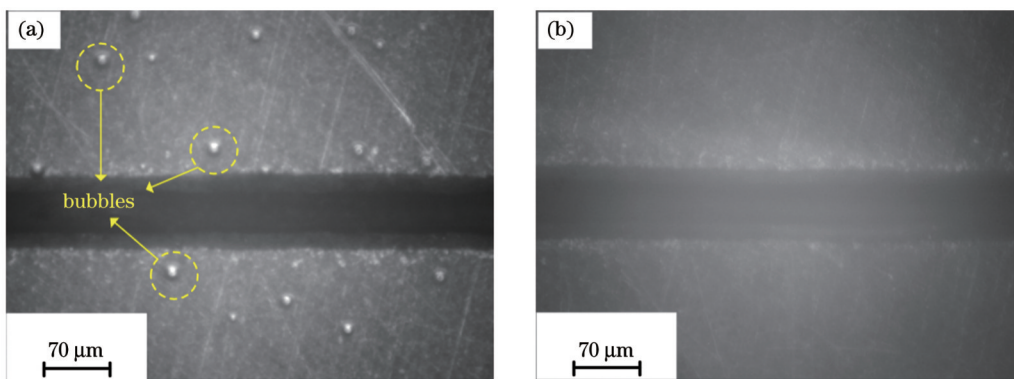


图 4 水射流环境下采集的样品表面图像。(a)微小气泡遮挡表面细节;(b)表面模糊

Fig. 4 Surface images of samples captured under waterjet environment. (a) Surface detail is covered by tiny bubbles; (b) blurred surface

表 2 图 5 所示图像的质量评估

Table 2 Quality assessment of the images in Fig. 5

Evaluated image	SD	AG	SF
Source image	33.5049	4.5903	7.6883
Processed image	40.2149	5.8574	8.0528

为了客观地衡量对源图像去雾及融合处理的质量,分别将空气环境下的源图像及融合图像作为参考

图像。表 3 列举了在空气和水射流环境下采集的 3 张源图像的质量评估结果。水射流环境下采集的图像质量相比空气环境下采集的明显降低,其中 SF 和 AG 平均下降了 33.88% 和 31.11%。水射流的加入使得图像的像素活跃度下降,细节和边缘变得模糊,可以提供有效信息减少,同时也提高了图像处理的难度。水射流环境下采集的图像经算法处理后,SD、AG 和 SF 这

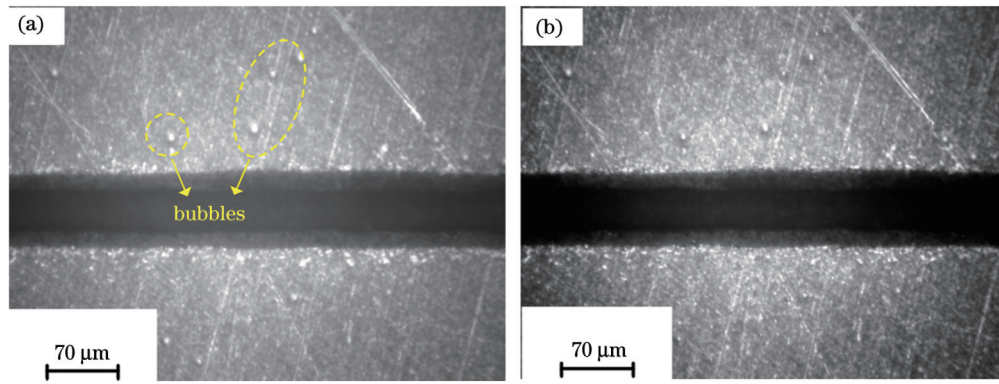


图 5 水射流环境下采集的源图像及其经算法处理后的图像。(a)源图像;(b)处理后的图像

Fig. 5 Source image captured under waterjet environment and the corresponding image processed by the algorithm. (a) Source image; (b) processed image

表 3 空气和水射流环境下算法处理图像的结果

Table 3 Results of algorithm processed images in air and waterjet environments

	Evaluated image	SD	AG	SF
Air	Source image 1	35.8335	6.1245	10.2699
	Source image 2	36.8607	7.0818	12.1435
	Source image 3	37.4372	8.2175	14.3567
	Processed image	47.5581	14.9499	28.5028
Waterjet	Source image 1	29.9278	4.7981	7.8360
	Source image 2	30.4720	4.9136	8.0306
	Source image 3	30.3592	5.1503	8.5109
	Processed image	45.3755	10.7462	19.1793

三个指标分别达到了参考图像的 95.41%、71.88% 和 67.29%。

3.3 不同水射流喷嘴直径下算法处理后的图像

水射流喷嘴直径不同,就会导致流动水层的厚度

发生改变。喷嘴直径越大,源图像可提供的信息量就越少,处理难度就越大。图 6 是水射流喷嘴直径分别为 0.4、0.8、1.2 mm 时采集到的材料表面源图像以及经算法处理后的图像,实验中保持水射流倾斜角为 45° 不变。

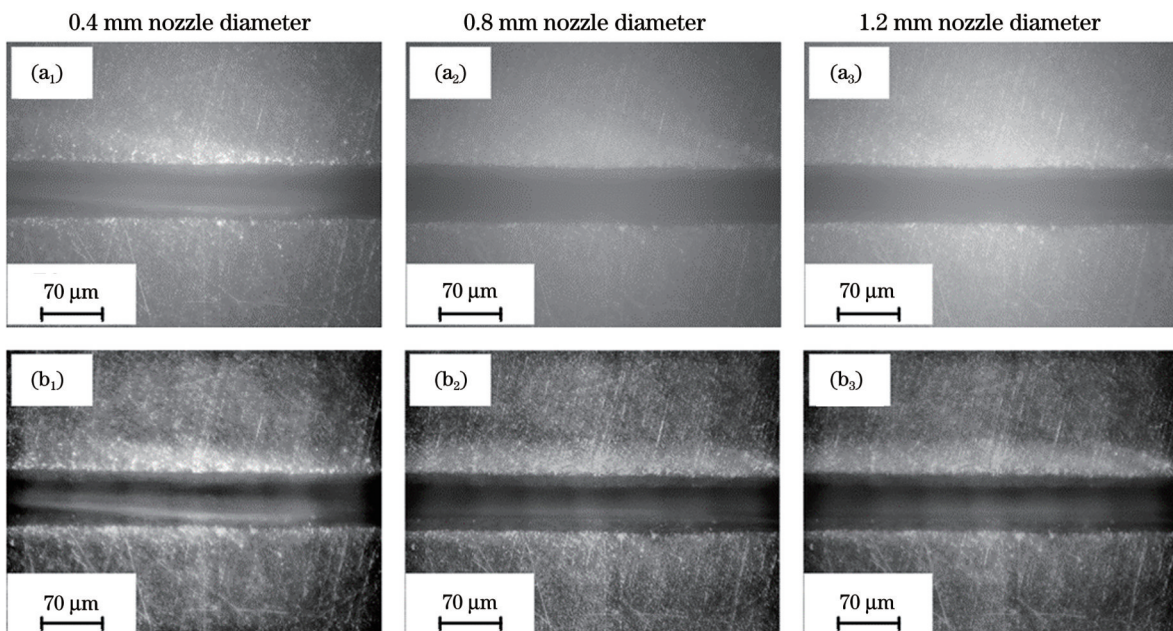


图 6 不同喷嘴直径(0.4、0.8、1.2 mm)下的图像。(a₁)~(a₃)源图像;(b₁)~(b₃)算法处理后的图像

Fig. 6 Images captured under different nozzle diameters (0.4, 0.8 and 1.2 mm). (a₁)~(a₃) Source images; (b₁)~(b₃) images processed by the algorithm

随着水射流喷嘴直径增大, 样件表面的水膜厚度逐渐增加, 从源图像中得到的信息逐渐减少。算法处理后的图像的 AG 和 SF 没有随着喷嘴直径的增大而增大 [如图 7(a) 所示], 与理想的处理效果 (参考图像) 相比, 只有 SD 的数值持续下降 [如图 7(b) 所示]。这是由于在处理过程中加强图像的细节信息可能会造成

伪影和部分失真^[35], 进而导致出现边缘特征, 所以处理后的图像与源图像的关联性下降。由图 7(b) 可以看出, 当喷嘴直径为 0.4 mm 时, 算法处理后的图像的 SD、AG、SF 指标分别达到了参考图像的 95.41%、71.88% 和 67.29%, 最大化排除了水射流的干扰, 可以还原部分细节特征。

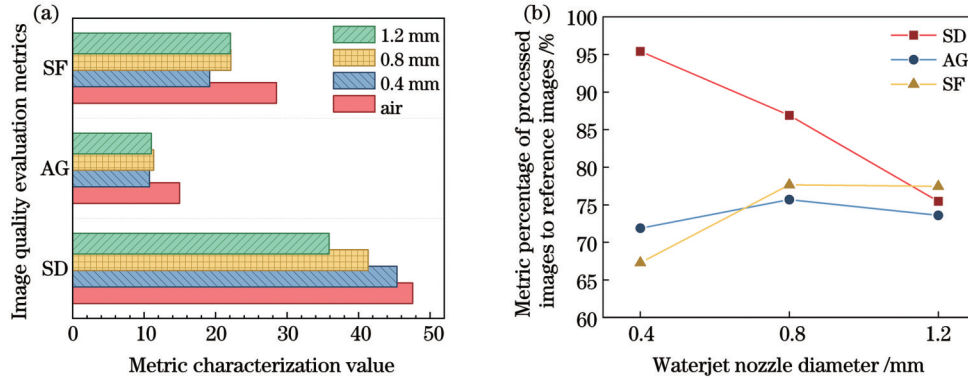


图 7 不同参数下算法处理后的图像的质量对比。(a) 空气环境和不同喷嘴直径下算法处理后的图像的评估指标; (b) 不同喷嘴直径下算法处理后的图像的质量

Fig. 7 Quality comparison of algorithm processed images under different parameters. (a) Evaluation metrics of algorithm processed images in air environment and under different nozzle diameters; (b) quality of algorithm processed images at different nozzle diameters

3.4 不同水射流倾斜角下算法处理后的图像

在不同倾斜角的水射流辅助激光加工中, 采集的源图像的质量也有所不同。倾斜角越小, 样件表面的水膜越厚,

能从源图像中得到的信息越少。图 8 为水射流倾斜角为 30°、45° 和 60° 时采集到的材料表面的源图像以及经过算法处理后的图像, 实验中保持水射流喷嘴直径为 0.4 mm 不变。

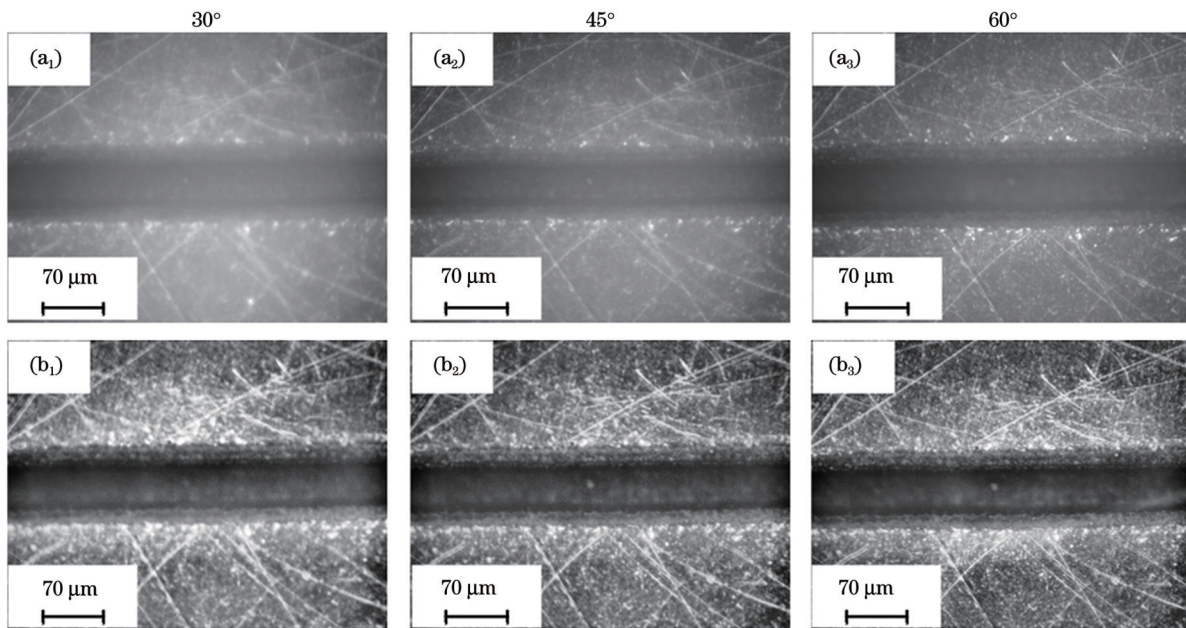


图 8 不同水射流倾斜角 (30°、45° 和 60°) 下的图像。(a₁)~(a₃) 源图像; (b₁)~(b₃) 算法处理后的图像

Fig. 8 Images under different waterjet inclination angles (30°, 45° and 60°). (a₁)–(a₃) Source images; (b₁)–(b₃) images processed by the algorithm

随着水射流倾斜角增大, 样件表面的水膜厚度逐渐减小。处理后的图像的三个指标都随着水射流倾斜角的增大而增大, 如图 9(a) 所示。由图 9(b) 可知: 在 60° 倾斜角下, 处理后的图像的 SD、AG 和 SF 三个

指标分别达到参考图像的 91.59%、75.51% 和 96.10%; 在 45° 倾斜角下, 处理后的图像的上述三个指标分别达到了参考图像的 90.59%、72.69% 和 94.50%; 在 30° 倾斜角下, 源图像的质量最差, 但处理后的图像的上

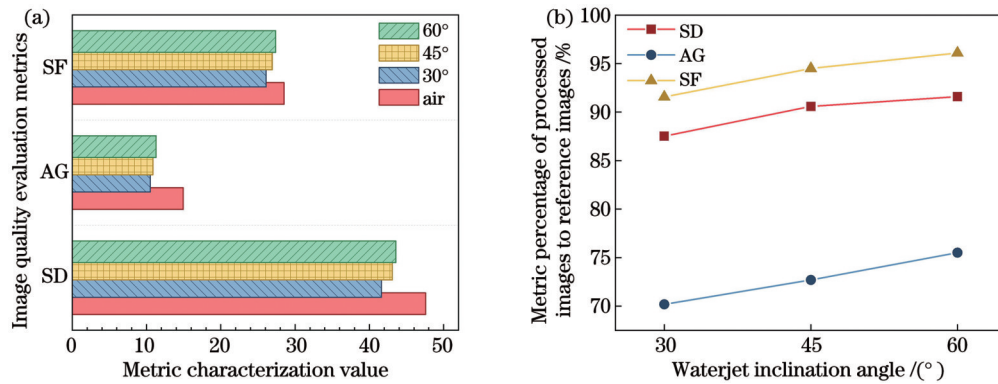


图9 不同参数下算法处理后的图像的质量对比。(a)空气环境和不同倾斜角下算法处理后的图像的评估指标;(b)不同倾斜角下算法处理后的图像的质量

Fig. 9 Quality comparison of the processed images under different parameters. (a) Evaluation metrics of the processed images in air environment and under different inclination angles; (b) quality of processed image at different inclination angles

述三个指标分别达到参考图像的 87.52%、70.18% 和 91.57%。

4 结 论

笔者根据形态学与自适应 Retinex 去雾理论去除水射流的干扰,提出了基于改进离散小波变换的图像融合算法,使处理后的图像达到了良好的处理效果。得到的具体结论如下:

1) 提出了水射流辅助激光加工样件表面图像融合算法。首先,结合前景阈值分割和形态学理论去除气泡,并利用自适应 Retinex 去雾算法进行处理,排除水射流对表面图像造成的干扰。其次,利用离散小波变换对图像进行分解,并根据人眼视觉原理拉伸细节分量。

2) 采用不同的喷嘴直径(0.4、0.8、1.2 mm)和不同的射流倾斜角(30°、45°、60°)改变流动水层的状态。实验结果表明:当喷嘴直径为 0.4 mm 时,处理后的图像的 SD、AG 和 SF 分别达到了参考图像的 95.41%、71.88% 和 67.29%;当射流倾斜角为 45° 时,处理后的图像的 SD、AG 和 SF 分别达到了参考图像的 90.59%、72.69% 和 94.50%。在不同状态的水射流干扰下,本文所提方法可以实现良好的处理效果。

综上所述,在水射流辅助激光加工中采集的材料表面的源图像,经过基于 Retinex 去雾算法的图像融合算法处理后可以有效削减水射流的影响,并可以解决源图像部分聚焦的问题。该方法为水射流辅助激光加工过程中材料表面加工状态的观测提供了一种实用有效的解决办法。

参 考 文 献

- [1] Wang J Q, Xu J K, Lian Z X, et al. Facile and green fabrication of robust microstructured stainless steel mesh for efficient oil/water separation via waterjet-assisted laser ablation[J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2022, 643: 128703.
- [2] 张喆, 宋琦, 张昆鹏, 等. 平顶飞秒激光开槽硅晶圆工艺仿真与实验研究[J]. *中国激光*, 2023, 50(20): 2002202.
- [3] Zhang Z, Song Q, Zhang K P, et al. Simulation and experimental research on flat top femtosecond laser grooving of silicon wafer[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2023, 50(20): 2002202.
- [4] Valdecasas A G, Marshall D, Becerra J M, et al. On the extended depth of focus algorithms for bright field microscopy[J]. *Micron*, 2001, 32(6): 559-569.
- [5] Wu Y H, Chen K, Zhang J, et al. Method of defogging image based on the sky area separation[C]//*Proceedings of the 2016 2nd Workshop on Advanced Research and Technology in Industry Applications*, May 14-15, 2016, Dalian, China. Paris: Atlantis Press, 2016: 1443-1448.
- [6] Huang W C, Yang Z, Jiao S B, et al. Research on color image defogging algorithm based on MSR and CLAHE[C]//*2020 Chinese Automation Congress (CAC)*, November 6-8, 2020, Shanghai, China. New York: IEEE Press, 2021: 7301-7306.
- [7] 张云涛, 刘惠萍, 黄益铭, 等. 基于图像分割和色适应变换白平衡的水下图像增强[J]. *激光与光电子学进展*, 2023, 60(14): 1410003.
- [8] Zhang Y T, Liu H P, Huang Y M, et al. Underwater image enhancement based on image segmentation and color adaptation transformation for white balance[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2023, 60(14): 1410003.
- [9] Yue D Q, Huang Y Y, Tang H Z, et al. Single image dehazing jointly utilizing dark channel prior and guided filtering in dual-tree complex wavelet domain[C]//*2020 17th International Computer Conference on Wavelet Active Media Technology and Information Processing (ICCWAMTIP)*, December 18-20, 2020, Chengdu, China. New York: IEEE Press, 2021: 10-13.
- [10] 刘译隆. 基于暗通道先验的海上图像去雾方法研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2022.
- [11] Liu Y L. Research on defogging method of maritime images based on dark channel prior[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2022.
- [12] Mouroulis P. Depth of field extension with spherical optics[J]. *Optics Express*, 2008, 16(17): 12995-13004.
- [13] Zhao T Y, Yu F H. Point spread function analysis of a cubic phase wavefront coding system with a circular pupil[J]. *Optics Express*, 2012, 20(3): 2408-2419.
- [14] David Giese J, Ford T N, Mertz J. Fast volumetric phase-gradient imaging in thick samples[J]. *Optics Express*, 2014, 22(1): 1152-1162.
- [15] Xie X H, Yu X B, Gao X, et al. Extended depth of field method with a designed diffraction optical element based on multi-depth fusion and end-to-end optimization[J]. *Optics Communications*, 2022, 517: 128317.
- [16] Zhao T Y, Mauger T, Li G Q. Optimization of wavefront-coded

- infinity-corrected microscope systems with extended depth of field [J]. *Biomedical Optics Express*, 2013, 4(8): 1464-1471.
- [14] 王伟, 张露鹤, 傅天文. 基于波前编码的扩展景深短波红外成像系统[J]. *激光与光电子学进展*, 2023, 60(10): 1011005.
Wang W, Zhang L H, Fu T W. Wavefront coding-based short-wave infrared imaging system for extended depth of field[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2023, 60(10): 1011005.
- [15] Yang Y, Cao S H, Wan W G, et al. Multi-modal medical image super-resolution fusion based on detail enhancement and weighted local energy deviation[J]. *Biomedical Signal Processing and Control*, 2023, 80: 104387.
- [16] Yang B, Zhong J Y, Li Y H, et al. Multi-focus image fusion and super-resolution with convolutional neural network[J]. *International Journal of Wavelets, Multiresolution and Information Processing*, 2017, 15(4): 1750037.
- [17] Simone G, Farina A, Morabito F C, et al. Image fusion techniques for remote sensing applications[J]. *Information Fusion*, 2002, 3(1): 3-15.
- [18] 宋加文, 朱大明, 付志涛, 等. 基于对比度和结构提取的红外与可见光图像融合[J]. *激光与光电子学进展*, 2023, 60(14): 1410005.
Song J W, Zhu D M, Fu Z T, et al. Infrared and visible image fusion based on contrast and structure extraction[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2023, 60(14): 1410005.
- [19] Kong W W, Wang B H, Lei Y. Technique for infrared and visible image fusion based on non-subsampled shearlet transform and spiking cortical model[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2015, 71: 87-98.
- [20] Jin X, Jiang Q, Yao S W, et al. A survey of infrared and visual image fusion methods[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2017, 85: 478-501.
- [21] 蔡真. 基于光特性的水下气泡探测技术研究[D]. 杭州: 杭州电子科技大学, 2015.
Cai Z. Research on underwater bubble detection technology based on optical characteristics[D]. Hangzhou: Hangzhou Dianzi University, 2015.
- [22] 梁刚明. 基于结构超图的形态学新算子[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2018.
Liang G M. A new morphological operator based on structural hypergraph[D]. Xi'an: Xidian University, 2018.
- [23] 武亚红. 不均匀低照度低质图像增强算法研究[D]. 南京: 南京邮电大学, 2021.
Wu Y H. Research on enhancement algorithm of uneven low illumination and low quality image[D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2021.
- [24] Lee C H, Shih J L, Lien C C, et al. Adaptive multiscale Retinex for image contrast enhancement[C]//2013 International Conference on Signal-Image Technology & Internet-Based Systems, December 2-5, 2013, Kyoto, Japan. New York: IEEE Press, 2014: 43-50.
- [25] Li D Y, Zhou J C, Wang S Y, et al. Adaptive weighted multiscale retinex for underwater image enhancement[J]. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2023, 123: 106457.
- [26] 杨娇. 基于小波变换的图像融合算法的研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2014.
Yang J. Research on image fusion algorithm based on wavelet transform[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2014.
- [27] Mallat S G. A theory for multiresolution signal decomposition: the wavelet representation[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1989, 11(7): 674-693.
- [28] Mallat S G. Multifrequency channel decompositions of images and wavelet models[J]. *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, 1989, 37(12): 2091-2110.
- [29] 卢彦飞. 基于局部视觉特征的图像质量客观评价方法研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2015.
Lu Y F. Research on objective evaluation method of image quality based on local visual features[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics and Precision Mechanics and Physics, 2015.
- [30] 陈勇, 吴明明, 房昊, 等. 基于差异激励的无参考图像质量评价[J]. *自动化学报*, 2020, 46(8): 1727-1737.
Chen Y, Wu M M, Fang H, et al. No-reference image quality assessment based on differential excitation[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2020, 46(8): 1727-1737.
- [31] Song Q, Wang Y H, Bai K. High dynamic range infrared images detail enhancement based on local edge preserving filter[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2016, 77: 464-473.
- [32] Jagalingam P, Hegde A V. A review of quality metrics for fused image[J]. *Aquatic Procedia*, 2015, 4: 133-142.
- [33] Shreyamsha Kumar B K. Image fusion based on pixel significance using cross bilateral filter[J]. *Signal, Image and Video Processing*, 2015, 9(5): 1193-1204.
- [34] Wang J Q, Xu J K, Chen G J, et al. Microstructural evolution, mechanical properties and surface quality of TC11 titanium alloy subjected to waterjet-assisted laser direct inscription[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2023, 24: 4986-5006.
- [35] Zhang W D, Dong L L, Xu W H. Retinex-inspired color correction and detail preserved fusion for underwater image enhancement[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2022, 192: 106585.

Image Fusion Algorithm of Waterjet-Assisted Laser Processing Features Based on Retinex Dehazing Algorithm

Li Ying^{1,2*}, Li Xinyue^{1,2}, Wang Jiaqi^{2**}, Xu Jinkai², Yu Huadong^{2,3}

¹*School of Opto-Electronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, Jilin, China;*

²*Ministry of Education Key Laboratory for Cross-Scale Micro and Nano Manufacturing, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, Jilin, China;*

³*School of Mechanical and Aerospace Engineering, Jilin University, Changchun 130025, Jilin, China*

Abstract

Objective Waterjet-assisted laser processing technology provides a new direction in the development of laser processing that can effectively mitigate thermal damage to materials during laser processing; thus, it has good prospect for microfabrication applications. During processing, the quality of the material surface can be inspected in real time, and the introduction of microscopic systems can provide a more convenient observation of material processing details as well as improve the corresponding efficiency. However, because of the interference of the waterjet, bubbles are present in the source image captured by the CCD camera, obscuring detailed

information and blurring the surface. In addition, the source image sequence is only partially focused because of the limited depth-of-field of the microscope system. To enhance the detail of surface features of materials for the purpose of dehazing, an image processing technique is employed to improve the contrast of an image by emphasizing the respective brightness, saturation, and textural features of local areas. However, conventional dehazing algorithms begin with the image itself. Without considering that the local area processing method has problems including loss of detailed information and excessive contrast enhancement, development of an image dehazing method for the local areas of different images is necessary. In the traditional microscope mode, the effect of extending the depth-of-field can be achieved via component deformation; however, this has reduced efficiency, large equipment size, and low lateral resolution. Currently, image fusion based on the transform domain is a popular research topic, and is one of the most widely used and mature methods in practical applications.

Methods This study solves the problems of waterjet interference and image fusion. Bubbles were maximally reduced via foreground segmentation and morphological theory, and the detailed information of the source images was enhanced according to the adaptive multiscale Retinex dehazing algorithm. After dividing the image into blocks, the detail index is defined by the standard deviation value of each block. The most suitable Gaussian filter function scale value was determined, and the corresponding weights were calculated to linearly superimpose the single-scale Retinex algorithm of different scales. The source image was decomposed into detail and approximate components using discrete wavelet transform, the detail component was stretched according to the human vision principle, and each discrete wavelet inverse transform was performed according to the fusion rules. As a result, a full-focus image with an extended depth-of-field can be realized.

Results and Discussions The experimental system adopted in this work was set up as depicted in Fig. 1, mainly constituting a laser processing and image capture system, and a high-pressure waterjet assist system. The processing and image capture system comprises a laser, waterjet nozzle, and CCD camera. The processed material surface images of the waterjet interference problem are presented in Fig. 5: (a) displays one of the source images captured in the waterjet environment and (b) shows the final processed image. The interference of bubbles on the image information in the processed image appears to fade, and more detailed features are restored. Compared with the source image, the average gradient (AG), standard deviation (SD), and spatial frequency (SF) of the processed image improved by 27.6%, 20.1%, and 4.74%, respectively. Table 3 presents the image quality comparison results of the three source images in the air and waterjet environments. In the waterjet environment, the image quality was significantly lower than that in the air environment, where the SF and AG were reduced by 33.88% and 31.11%, respectively. Figure 6 shows the source images of the material surface collected for waterjet nozzle diameters of 0.4, 0.8, and 1.2 mm as well as the processed images after algorithmic processing. As the diameter of the waterjet nozzle increases, the thicker the flowing water layer on the surface of the sample, and the more limited the image information that can be obtained from the source image. According to Fig. 7(b), the three indicators of the processed image obtained with the diameter nozzle of 0.4 mm reached 95.41%, 71.88%, and 67.29%, respectively. Fig. 8 displays the source images of the material surface collected for waterjet inclination angles of 30°, 45°, and 60°, besides the processed images after algorithmic processing. As the waterjet inclination angle decreases, the thicker the flowing water layer on the surface of the sample, the more limited the image information that can be obtained from the source image. As shown in Fig. 9(b), the three indicators of the processed image considering the 45° angle reached 90.59%, 72.69%, and 94.50%, respectively; thus, maximizing the exclusion of the interference of the waterjet, which could restore part of the detailed features.

Conclusions In waterjet-assisted laser processing, microscopic images of material surfaces are subject to waterjet interference and depth-of-field limitations. Therefore, we propose a waterjet laser processing image-fusion algorithm based on the Retinex dehazing algorithm. The method determines different Gaussian filter function scales for various images, improves the dehazing effect of traditional algorithms, and stretches the detailed components according to human vision. As a result, detail of source image information was enhanced and the image quality was improved. Experiments demonstrate that the algorithm reduces the interference of the waterjet in the source image, enhances the detailed information of the image, and achieves full focus. As the diameter of the waterjet nozzle increases and the inclination angle decreases, the water film on the surface of the material becomes thicker, and the quality of the source image is subsequently reduced, which is difficult for the algorithm to process. However, the experimental results show that with the nozzle diameter of 1.2 mm or an inclination angle of 30°, the processed image still presents most of the detailed features and improved image quality. Thus, the developed algorithm can effectively improve the efficiency of waterjet-assisted laser processing and is expected to be widely used in liquid-assisted laser processing.

Key words image processing; waterjet-assisted laser processing; Retinex dehazing algorithm; discrete wavelet transform; image fusion