

## 透烟雾红外数字全息像的亮度增强算法

赵丹露<sup>1,2</sup>, 张永安<sup>1,2\*</sup>, 何光辉<sup>1,2</sup>, 黄俊豪<sup>1,2</sup>, 张亚萍<sup>1,2</sup><sup>1</sup>昆明理工大学理学院, 云南 昆明 650500;<sup>2</sup>昆明理工大学云南省现代信息光学重点实验室, 云南 昆明 650500

**摘要** 红外数字全息具有强穿透性,可以透过烟雾成像,但研究发现在烟雾环境下,红外数字全息重建像存在部分阴影区域,不能满足对成像质量的要求。为此提出了一种透烟雾红外数字全息像的亮度增强算法。该算法首先使用双边滤波器去除图像的散斑噪声,然后利用二值化、边缘提取、形态学算法分割阴影区域,最后使用基于 Tent 优化的麻雀搜索算法寻找阴影区域与明亮区域的类间方差最小值,实现增强阴影区域亮度的目的。在烟雾环境下进行实验,拍摄一系列红外全息图后,选取一个完整烟雾周期内的六张样本图像进行处理。实验结果表明,经提出的算法处理后,图像的峰值信噪比(PSNR)、均方误差(MSE)和特征相似度(FSIM)值都优于其他图像增强算法,验证了此算法对透烟雾红外数字全息图像阴影区域亮度增强的有效性与优越性。

**关键词** 全息; 数字全息; 图像增强; 红外成像; 亮度增强; 麻雀搜索算法

中图分类号 O438

文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL221316

## 1 引言

近年来,全息技术发展迅速,已应用于许多科学和技术领域,例如形状和应变测量<sup>[1-3]</sup>、光学图像加密<sup>[4-5]</sup>、生物样品定量分析<sup>[6-7]</sup>、实时模式和高分辨率<sup>[8-9]</sup>,并在三维(3D)成像和显示中广泛使用<sup>[10]</sup>。可见光波段的数字全息技术经过多年的研究发展,已成为成像领域里一种至关重要的观察和检测方法<sup>[11]</sup>。但在工业领域,在某些存在烟雾、火焰干扰的环境中,传统的可见光数字全息的局限性越来越明显。研究发现,红外(IR)光透过高密度物场的能力明显高于可见光,红外全息可以透过烟雾和火焰进行拍摄成像,为全息技术开辟了新的应用领域。

2007年,Hesselink等<sup>[12]</sup>首次使用红外电荷耦合器件(CCD)拍摄了红外全息图。2009年,钟杰等<sup>[13]</sup>将红外全息用于粒子场进行研究,得出了采用红外激光同轴全息技术进行小尺寸、高密度粒子场的实验诊断具有一定优势的结论。2013年,Locatelli等<sup>[10]</sup>在红外范围内利用无透镜数字全息技术成功地通过烟雾和火焰成像,通过实验验证了连续激光数字全息术允许记录动态人体尺寸目标。之前的研究中,还未有学者对红外全息重建图像做增强处理。直到2016年之后,南京邮电大学刘宁(Liu)团队才对红外数字全息图像增强关键技术进行了研究,包括红外数字全息的自适应聚焦算法<sup>[14]</sup>、红外数字全息干涉条纹增强算法<sup>[15]</sup>、红外数

字全息零级衍射滤波算法<sup>[16]</sup>、透火焰红外数字全息图像的分辨率增强算法<sup>[17]</sup>等,这些算法对红外数字全息重建图像细节信息增强效果较好,但并未针对烟雾遮挡的阴影区域做处理。

通过烟雾环境下的红外数字全息实验发现,目标物的重建像散斑噪声严重,同时存在明显阴影区域。针对散斑噪声,使用双边滤波器去除噪声并保留图像细节。红外全息重建像中的阴影区域分布较为连续,与明亮区域存在明显的分界线。针对这一特点,本文提出利用边缘提取算法和形态学算法分割阴影区域,并利用基于 Tent 优化的麻雀搜索算法(SSA)寻找阴影区域和明亮区域类间方差最小值,从而达到阴影区域亮度增强的效果。

## 2 基本原理

## 2.1 实验装置及光路

本文光路基于马赫-曾德尔干涉光路进行设计搭建,具体光路如图1所示。该光路由激光器、分束镜(BS)、反射镜、空间滤波准直扩束系统(SFBE)、烟雾发生装置(SG)和感光元件等构成。由于红外激光不可见,光路由 He-Ne 激光器(波长  $\lambda = 532 \text{ nm}$ ) 引导搭建,红外激光由红外半导体激光器(波长  $\lambda = 1064 \text{ nm}$ ) 发出,经过分束镜 BS1(分束比为 1:2)后分为两束,一束光依次经过反射镜 M、准直扩束系统 SFBE1、烟雾发生装置和成像物体(半径为 3 cm 的奖牌,如图 2 所

收稿日期: 2022-10-11; 修回日期: 2022-12-05; 录用日期: 2022-12-16; 网络首发日期: 2023-02-07

基金项目: 国家自然科学基金(61865007, 62275113)

通信作者: \*1295720542@qq.com

示)后作为物光,另一束光作为参考光经过准直扩束系统 SFBE2 后与物光在分束镜 BS2 处形成干涉,最后被

CCD(分辨率为 1920 pixel×1080 pixel)接收形成散斑干涉图样。

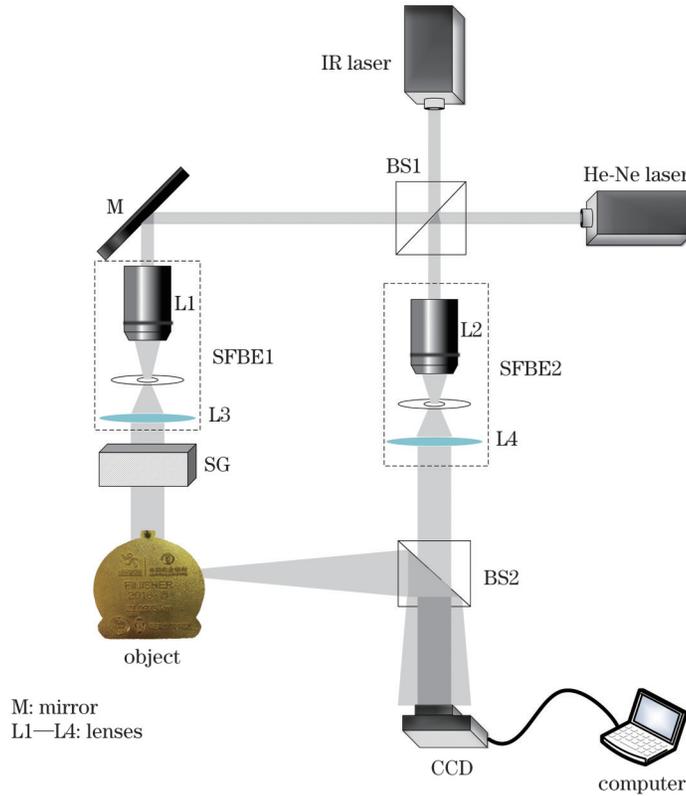


图 1 过烟雾马赫-曾德尔干涉光学装置

Fig. 1 Mach-Zehnder interferometric optical setup with optical path through smoke

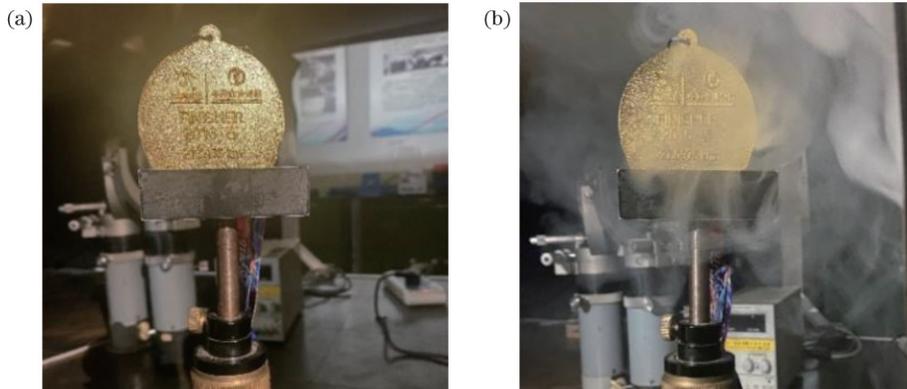


图 2 模拟烟雾成像效果。(a)成像物体;(b)过烟雾成像

Fig. 2 Simulation of smoke imaging effect. (a) Object to be imaged; (b) imaging through smoke

### 2.2 成像原理

物光和参考光在 CCD 上形成干涉,其光强分布可表示为  $I(x, y)^{[18]}$ :

$$I(x, y) = A^2 + |O(x, y)|^2 + 2A|O(x, y)| \cos[\phi(x, y) - kx \cos \theta_x - ky \cos \theta_y], \quad (1)$$

式中:  $A$  为强度;  $\theta_x, \theta_y$  分别代表参考光和  $x, y$  方向之间的角度;  $O(x, y)$  和  $\phi(x, y)$  分别表示物光的幅度和相

位;  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ ,  $\lambda$  为红外激光波长。

式(1)右边包含三个部分: 第一项与第二项表示零级衍射, 第三项表示实像和共轭像, 在重建像中为 +1 级和 -1 级。本文将提取重建像中的 -1 级做后续处理。

根据菲涅耳衍射公式可以计算出全息图平面上的光强分布为  $O(x, y)$ :

$$O(x, y) = \frac{\exp(jkd)}{jkd} \exp\left[\frac{jk(x^2 + y^2)}{2d}\right] F\left[O(x_0, y_0) \exp\left[\frac{jk(x_0^2 + y_0^2)}{2d}\right]\right] = |O(x, y)| \exp[j\phi(x, y)], \quad (2)$$

式中： $O(x_0, y_0)$ 为物光的复振幅分布； $d$ 为物体到全息图平面的距离。

按照图 1 搭建反射式红外全息实验光路，在无烟雾与有烟雾环境下分别拍摄的奖牌红外全息图如图 3 所示。从图 3(a)和图 3(b)的对比可明显看出，物光场存在的烟雾干扰使干涉条纹模糊，对比度降低；图 3(c)和图 3(d)为无烟和有烟红外全息图的重建像；为便于观

察及后续研究，从图 3(c)和图 3(d)中白色矩形框提取出 -1 级重建像，如图 3(e)和图 3(f)所示，可以看出烟雾环境下重建像明显存在阴影区域，亮度不均，物体细节信息缺失。为此，本文参考柴金燕等<sup>[19]</sup>的透火焰红外数字全息图像的分辨率增强算法对透烟雾重建像进行处理，但由于此算法着重于重建像细节，并未对其做亮度增强，故而对烟雾造成的阴影改善效果不明显。

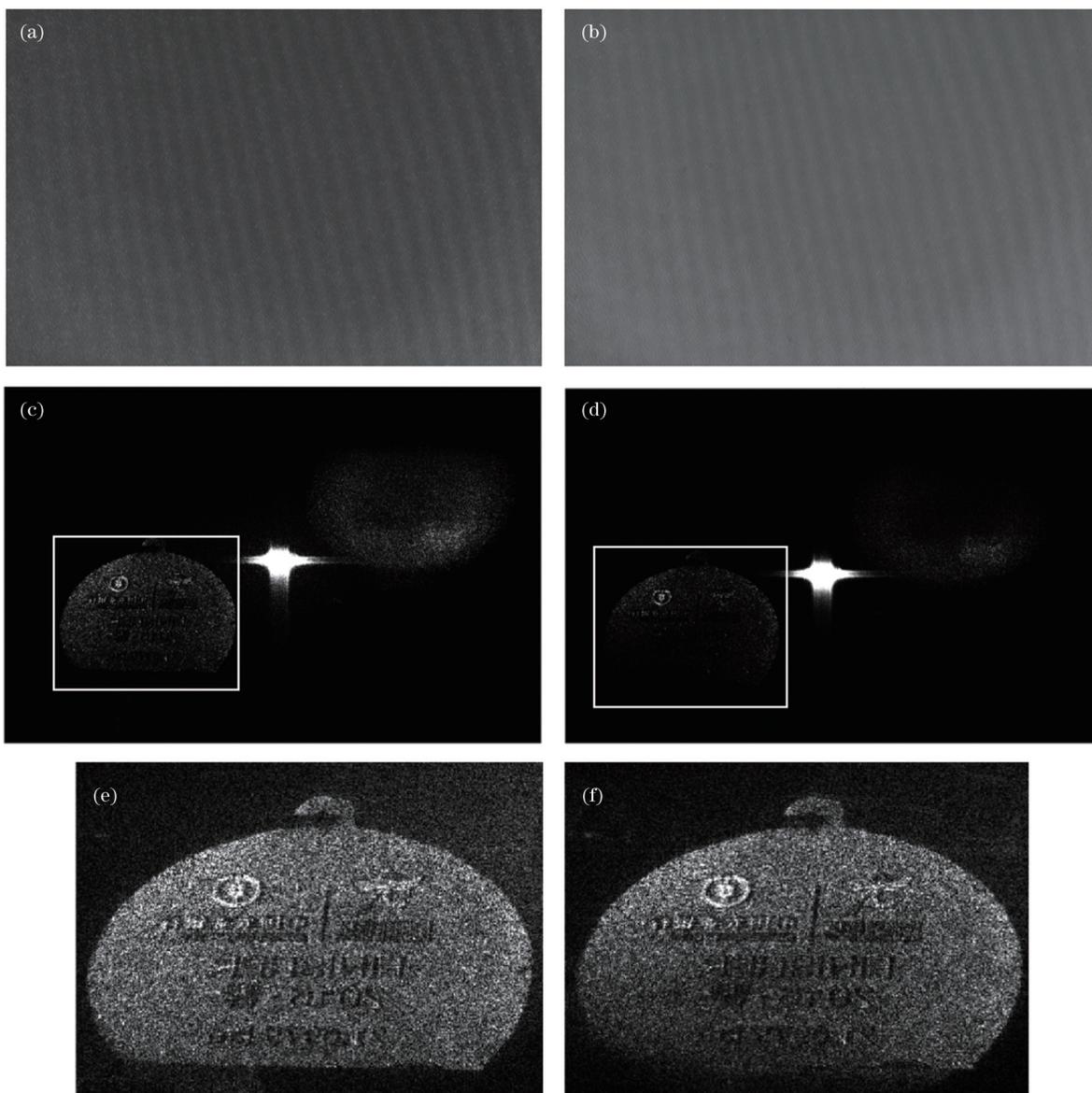


图 3 全息图及重建像。(a)无烟雾全息图；(b)透烟雾场全息图；(c)无烟雾重建像；(d)透烟雾场重建像；(e)无烟雾-1级像提取图；(f)透烟雾场-1级像提取图

Fig. 3 Holograms and reconstructed images. (a) Smoke-free hologram; (b) through-smoke hologram; (c) reconstructed image without smoke; (d) reconstructed image through smoke field; (e) smoke-free -1 order image extraction result; (f) through-smoke -1 order image extraction result

### 3 算法原理

本文的算法分为四个主要步骤：图像预处理、分割目标对象、分割阴影区域和阴影区域亮度增强。具体算法流程如图 4 所示。首先对图像做预处理，使用双边滤波器去除明显的散斑噪声；接着对图像

进行二值化处理，提取图像边缘信息进行膨胀和填充运算，结合最大连通区域算法分割出目标对象；然后采用边缘提取算法、膨胀和填充运算从目标对象区域中分割阴影区域；最后用优化麻雀搜索算法对阴影区域进行亮度增强，输出亮度增强后的红外全息重建图像。

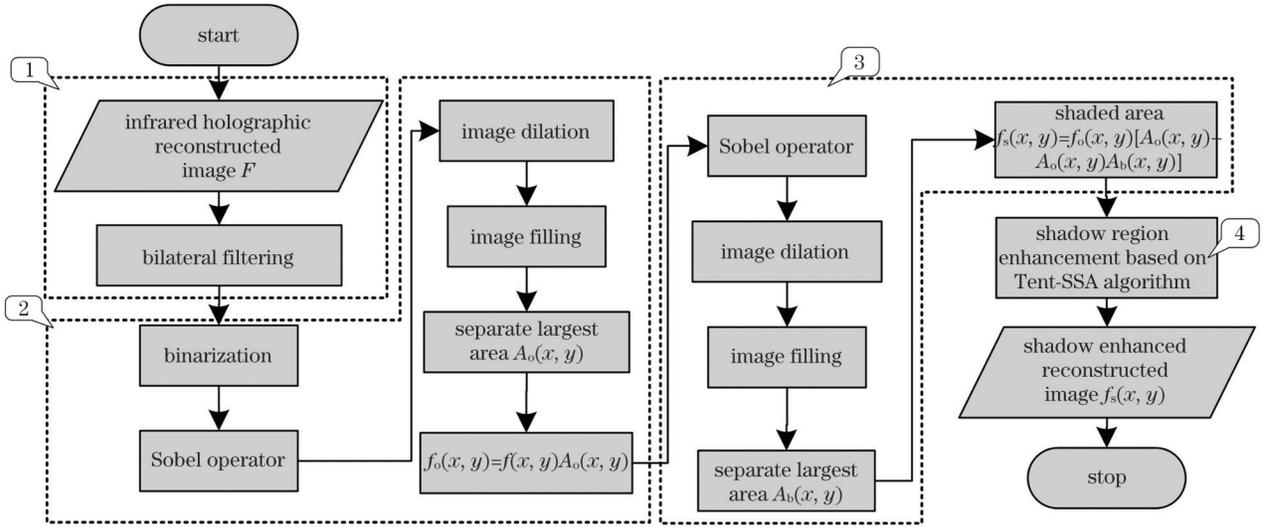


图 4 算法流程

Fig. 4 Algorithm flow chart

3.1 图像预处理

由于数字全息中相干成像和 CCD 像素尺寸有限,不可避免地会产生相干散斑噪声,因而导致重建图像的质量严重低于原始图像。散斑噪声是一种黑白斑点,其对图像灰度值的影响是不确定的<sup>[20]</sup>。为了降低散斑噪声带来的影响,本文使用双边滤波器对重建图像进行降噪处理。在用传统去噪算法包括高斯滤波、三维块匹配(BM3D)及中值滤波对重建图像进行处理后,发现上述算法在去噪的同时会使图像变得更模糊,使细节信息丢失更为严重,例如 BM3D 去噪效果如图 5(a)所示。双边滤波与传统算法相比效果更好,在去除散斑噪声的同时可以保留更多的细节信息,如图 5(b)所示。

双边滤波器公式为

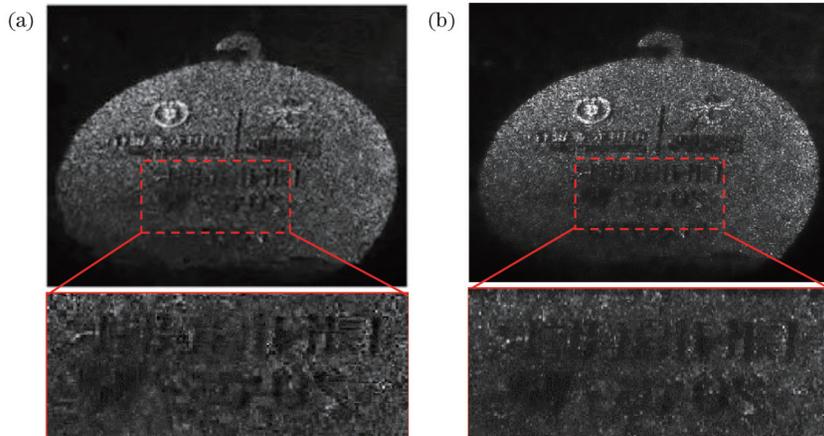


图 5 重建像去噪。(a)BM3D 去噪;(b)双边滤波去噪

Fig. 5 Reconstructed image denoising. (a) BM3D denoising; (b) bilateral filtering denoising

3.2 分割目标对象

从双边滤波去噪处理后的图 5(b)可以看出,重建像受烟雾阴影影响较大,阴影部分与背景部分信息极为相

似,不能对阴影区域直接进行分割处理。为了获取阴影区域,首先需要分割目标对象,采用最大类间方差法对图像进行二值化处理,分割前景和背景并消除阴影部分

$$g(x, y) = \frac{\sum_{k, l} f(k, l) \omega(x, y, k, l)}{\sum_{k, l} \omega(x, y, k, l)}, \quad (3)$$

$$d(x, y, k, l) = \exp\left[-\frac{(x-k)^2 + (y-l)^2}{2\sigma_d^2}\right], \quad (4)$$

$$r(x, y, k, l) = \exp\left(-\frac{\|f(x, y) + f(k, l)\|^2}{2\sigma_r^2}\right), \quad (5)$$

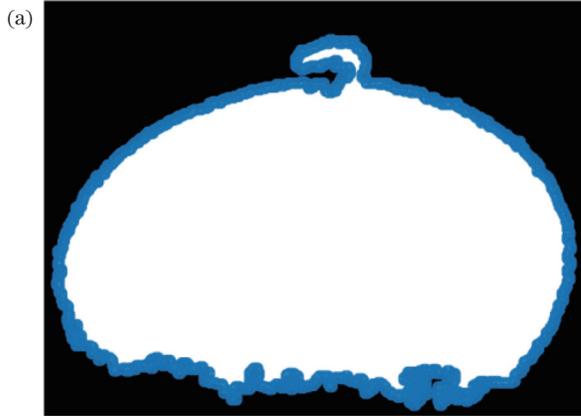
$$\omega(x, y, k, l) = d(x, y, k, l)r(x, y, k, l), \quad (6)$$

式中: $f(x, y)$ 为输入图像; $g(x, y)$ 为输出图像; $f(k, l)$ 为滤波器邻域像素点; $(x, y), (k, l)$ 为像素点坐标; $\omega(x, y, k, l)$ 为权重系数,是定义域核 $d(x, y, k, l)$ 和值域核 $r(x, y, k, l)$ 的乘积; $\sigma_d$ 为全局方差; $\sigma_r$ 为局部方差。

对目标对象提取的影响。最大类间方差法又称大津法<sup>[21]</sup>,是一种自适应确定阈值、基于全局的二值化算法。按照最大类间方差法求得的阈值进行图像二值化分割后,前景与背景图像类间方差最大,二值化后的图像为  $g_2(x,y)=B\{g(x,y)\}$ ,其中 B 表示二值化。

接下来使用 Sobel 算子提取二值化图像边缘信息。Sobel 算子一般用于边缘提取,其计算式为

$$G_x = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix}, G_y = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{bmatrix}, \quad (7)$$



$g_3(x,y)=|g_2(x,y)*G_x|+|g_2(x,y)*G_y|$ , (8) 式中: $g_2(x,y)$ 为上文处理好的二值化图像; $G_x$ 为水平方向的卷积模板; $G_y$ 为垂直方向的卷积模板; $g_3(x,y)$ 为边缘提取图像的结果。

然后对边缘提取图像进行膨胀和填充运算,结合最大连通区域算法,对形态学分割的目标图像的轮廓按最大连通区域进行标记。最后根据标记的轮廓填充图像,对每一部分填充区域计算面积,最大面积区域即为目标对象区域,如图 6(a)所示。



图 6 目标对象提取结果。(a)目标对象区域;(b)分割的目标对象  
Fig. 6 Target object extraction result. (a) Target object area; (b) segmented target object

最大连通域标记方法步骤如下。

(1) 随机选取某一像素点。

(2) 判断该像素点是否为背景像素,若不为背景像素,则对其 8 邻域进行搜索,同时新建一类标记,若为背景,则返回步骤(1)。

(3) 判断 8 邻域内的像素点是否均为背景像素点或已被标记的点。若是,则随机选取其他像素点,重复步骤(2)、(3)直至不再产生新的标记点;若不是,则随机选取 8 邻域内的像素点,再重复步骤(2)、(3)直至 8 邻域内的像素点不再产生新的标记点。统计每个类中被标记点的个数。

(4) 重复步骤(1)~(3)直至遍历完所有像素点。比较每个类被标记点的个数,最大的为目标区域,令其为  $A_o(x,y)$ ,则目标对象  $f_o(x,y)$  为

$$f_o(x,y)=f(x,y)A_o(x,y), \quad (9)$$

式中: $f(x,y)$ 为输入图像。

最后分割出的目标对象如图 6(b)所示。

### 3.3 分割阴影区域

在完成对目标对象的分割后,再进行目标对象阴影区域的分割。阴影区域分割方法与目标对象分割方法类似,不同点是分割阴影区域是基于目标对象进行分割,且不对目标对象进行二值化处理。若再次进行二值化处理,将会消除阴影区域与正常亮度区域的梯度信息。具体步骤为先对目标对象使用 Sobel 算子提取边缘信息,之后进行膨胀、填充处理,处理结果如

图 7(a)~图 7(c)所示。最后使用最大连通区域算法提取最大连通域,标记为  $A_b(x,y)$ ,则阴影区域  $f_s(x,y)$  为

$$f_s(x,y)=f_o(x,y)[A_o(x,y)-A_o(x,y)A_b(x,y)]. \quad (10)$$

阴影区域分割结果如图 7(d)所示。目标对象中的明亮部分  $f_b(x,y)$  为

$$f_b(x,y)=f_o(x,y)[A_o(x,y)A_b(x,y)]. \quad (11)$$

### 3.4 基于改进麻雀算法的阴影区域亮度增强

针对在阴影区域非线性增强过程中需手动调整参数、算法效率较低的问题,本文提出使用改进的麻雀搜索算法进行图像增强,该算法具有寻优能力强,收敛速度快的优点。本节基于改进麻雀搜索算法进行阴影区域亮度增强以确保全局均匀光照,在复杂场景中具有更好的鲁棒性。根据图像每个区域的像素照度,计算明亮区域中阴影的分布来去除阴影:

$$f_s'(x,y)=f_s(x,y)-E[f_s(x,y)]\frac{SD[f_b(x,y)]}{SD[f_s(x,y)]}+\delta, \quad (12)$$

式中: $f_s'(x,y)$ 为亮度调整后的红外全息重建图; $E[f_s(x,y)]$ 为阴影区域的均值; $SD[f_s(x,y)]$ 、 $SD[f_b(x,y)]$ 为阴影区域和明亮区域的标准差; $\delta$ 为亮度偏差值,可通过麻雀搜索算法求出。

依据最大类间方差法定理,认为当阴影区域和明

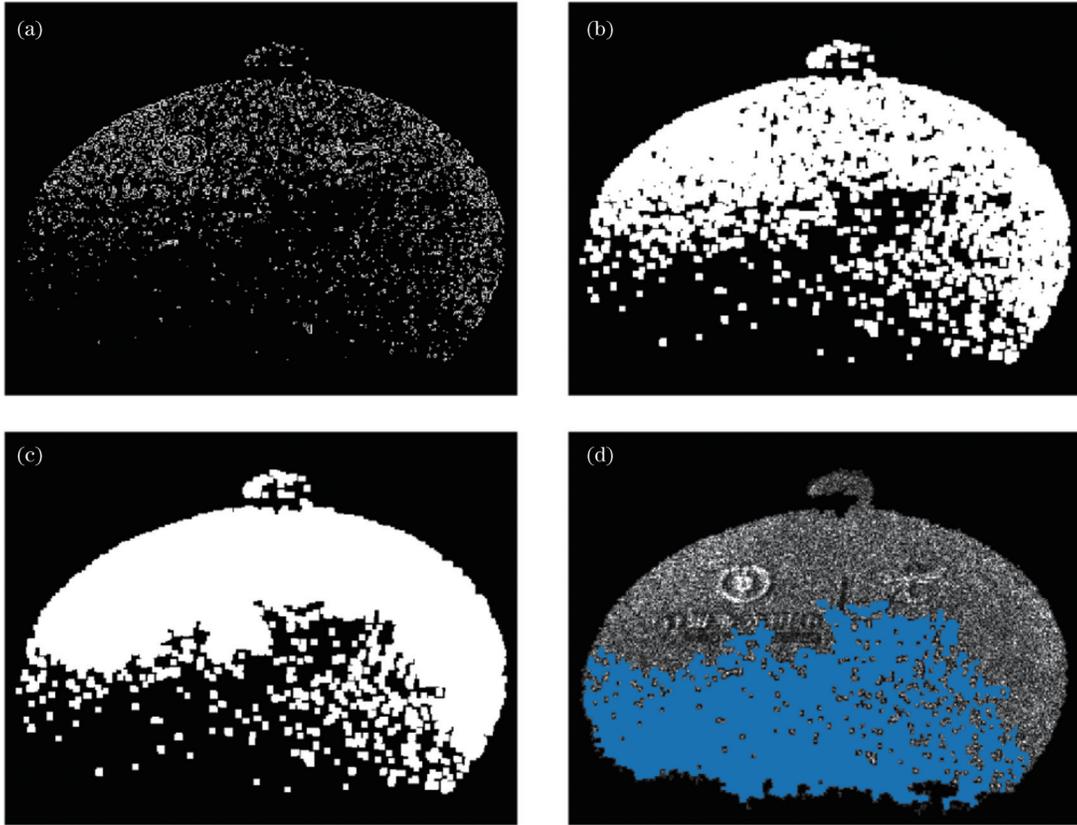


图 7 阴影区域分割结果。(a)Sobel算子处理边缘;(b)图像膨胀;(c)图像填充;(d)阴影区域分割

Fig. 7 Results of shaded area segmentation. (a) Edge processing by Sobel operator; (b) image expansion; (c) image filling; (d) segmentation of shaded area

亮区域的类间方差最小时,两个区域的亮度偏差最小,全息重建像亮度更均衡。改进麻雀搜索算法的适应度函数定义为

$$h = \omega_0 \omega_1 (\mu_0 - \mu_1)^2, \quad (13)$$

式中: $h$ 代表类间方差; $\omega_0$ 为阴影区域占目标区域的比例; $\omega_1$ 为明亮区域占目标区域的比例; $\mu_0$ 为阴影区域的灰度平均值; $\mu_1$ 为明亮区域的灰度平均值。

设种群中有  $N$  只麻雀,则由所有个体组成的种群可表示为  $X = \{\delta_1, \delta_2, \delta_3, \dots, \delta_N\}$ ,并代入计算类间方差(适应度) $H = \{h_1, h_2, h_3, \dots, h_N\}$ 。在麻雀搜索算法中,将个体区分为发现者、跟随者和警戒者,每个个体位置对应一个解。在觅食过程中,通过不断更新三者位置,完成资源的获取。

为优化麻雀搜索算法对适应度函数的收敛速度,利用 Tent 映射对种群进行初始化,子个体  $\delta_n$  的计算公式为

$$\delta_n = \begin{cases} \frac{\delta_n}{\alpha}, & 0 \leq \delta_n \leq \alpha \\ \frac{1 - \delta_n}{1 - \alpha}, & \alpha < \delta_n \leq 1 \end{cases}, \quad (14)$$

式中: $\alpha \in (0, 1)$ ,一般取 0.5。

发现者的位置更新方式如下:

$$\delta_i^{t+1} = \begin{cases} \delta_i^{t+1} \cdot \exp\left(\frac{-i}{\alpha \times M}\right), & R_2 < T_s \\ \delta_i^{t+1} + Q, & R_2 \geq T_s \end{cases}, \quad (15)$$

式中: $t$ 为当前迭代次数; $\delta_i^t$ 为迭代  $t$  次后第  $i$  只麻雀的位置; $\alpha \in [0, 1]$ ;  $M$  为最大迭代次数; $R_2$  为报警值; $T_s$  为安全阈值; $Q$  为随机数,服从正态分布。

跟随者的位置更新方式如下:

$$\delta_i^{t+1} = \begin{cases} Q \exp\left(\frac{\delta_{\text{worst}}^t - \delta_i^t}{i^2}\right), & i > \frac{N}{2} \\ \delta_p^{t+1} + |\delta_i^t - \delta_p^{t+1}|, & i \leq \frac{N}{2} \end{cases}, \quad (16)$$

式中: $x_{\text{worst}}^t$  为第  $t$  代适应度最差的个体位置; $x_p^{t+1}$  表示第  $i + 1$  代中适应度最佳的个体位置。

警戒者位置更新方式如下:

$$\delta_i^{t+1} = \begin{cases} \delta_{\text{best}}^t + \beta |\delta_i^t - \delta_{\text{best}}^t|, & f_i > f_g \\ \delta_i^t + k \left( \frac{|\delta_i^t - \delta_{\text{best}}^t|}{f_i - f_w + \epsilon} \right), & f_i = f_g \end{cases}, \quad (17)$$

式中: $x_{\text{best}}^t$  为第  $t$  代全局最优位置; $\beta$  为控制步长,服从均值为 0、方差为 1 的正态分布; $k \in [-1, 1]$ ;  $\epsilon$  为最小常数,用以避免分母为 0; $f_i$  为当前个体的适应度值; $f_g$  和  $f_w$  为目前全局最优和最差个体的适应度值。

基于改进麻雀搜索算法的阴影区域亮度增强算法流程为：

- (1) 利用式(14)进行 Tent 种群初始化,同时初始化迭代次数。
- (2) 利用式(13)式计算适应度值,并排序。
- (3) 利用式(15)更新发现者位置。
- (4) 利用式(16)更新跟随者位置。
- (5) 利用式(17)更新警戒者位置。

- (6) 计算适应度值并更新麻雀位置。
- (7) 达到最大迭代次数后,输出麻雀最佳位置,代入式(12)计算出增强后的阴影区域。

算法流程图如图 8 所示。本文对于麻雀搜索算法的改进主要是在初始化种群时利用 Tent 映射实现初始化。为改善基本麻雀搜索算法的寻优性能,通过算法混合,在麻雀搜索算法中引入优进策略,以加强粒子群的局部寻优效率和全局寻优性能。

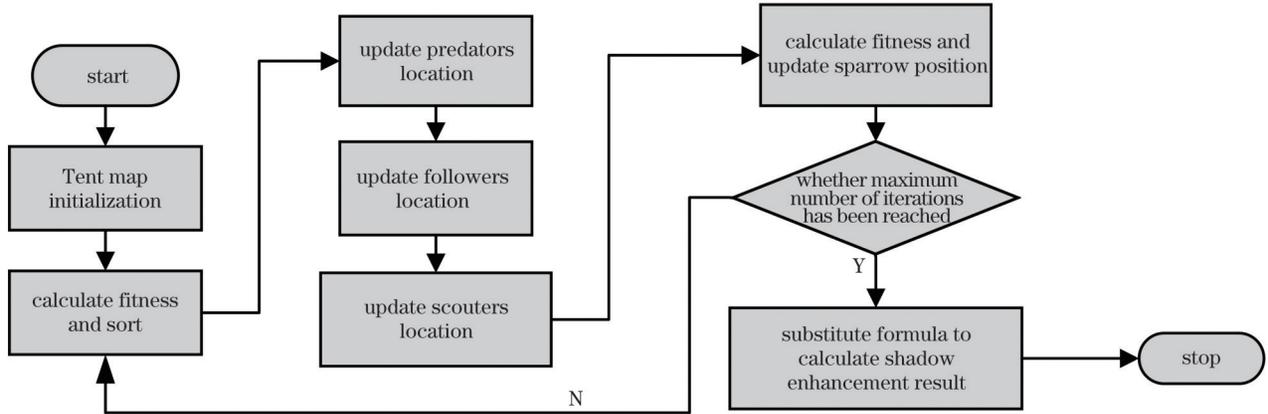


图 8 Tent-SSA 算法流程  
Fig. 8 Tent-SSA algorithm flow chart

图 9(a) 和图 9(b) 为 SSA 算法与 Tent-SSA 算法迭代进行对比的结果,实验中取种群规模最大迭代次数  $M = 40$ 。从图 9(a) 可以看出 Tent-SSA 算法收敛效果更好,所能达到的类间方差值也最小,意味着其亮度调整结果最优;而从图 9(b) 可以看出,因为改进算法中加入了 Tent 初始化,寻找到最优亮度偏

差值的速度更快,亮度偏差曲线更快达到平稳状态。种群结果表明:所提算法能够克服 SSA 易陷入局部最优的缺点,提高了算法的搜索精度、收敛速度和稳定性。通过优化 SSA 算法智能寻找最优亮度偏差值,最终输出亮度增强最合适的红外全息重建图像。

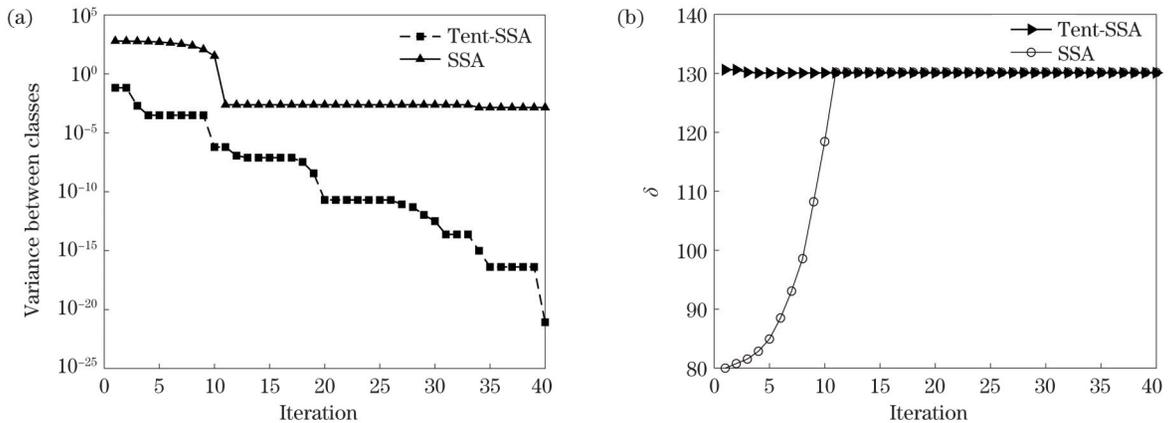


图 9 SSA 算法与 Tent-SSA 算法对比结果。(a) 目标函数的收敛性;(b) 亮度偏差曲线

Fig. 9 Comparison between SSA algorithm and Tent-SSA algorithm. (a) Convergence plot of objective function; (b) brightness deviation curve

## 4 分析与讨论

### 4.1 透烟雾红外数字全息像的亮度增强算法成像效果

在实验中,烟雾环境是一个非理想、不均匀的粒子场,并且实验装置中尚未设置烟雾存储空间,烟雾极易消散,因此很难实现动态的实时记录。为对一个相对

较完整周期烟雾变化下的红外全息图做记录,实验设置红外 CCD 采集全息图间隔时间  $\Delta t = 2 \text{ s}$ ,在不动光学装置的前提下,于烟雾发生和消散的过程中连续采集了 15 张红外全息图样本。选取烟雾连续变化中较明显的 6 张红外全息图进行重建,并用透烟雾红外数字全息像的亮度增强算法做阴影区域亮度增强处理。重建像原图与增强像对比结果如图 10 所示。

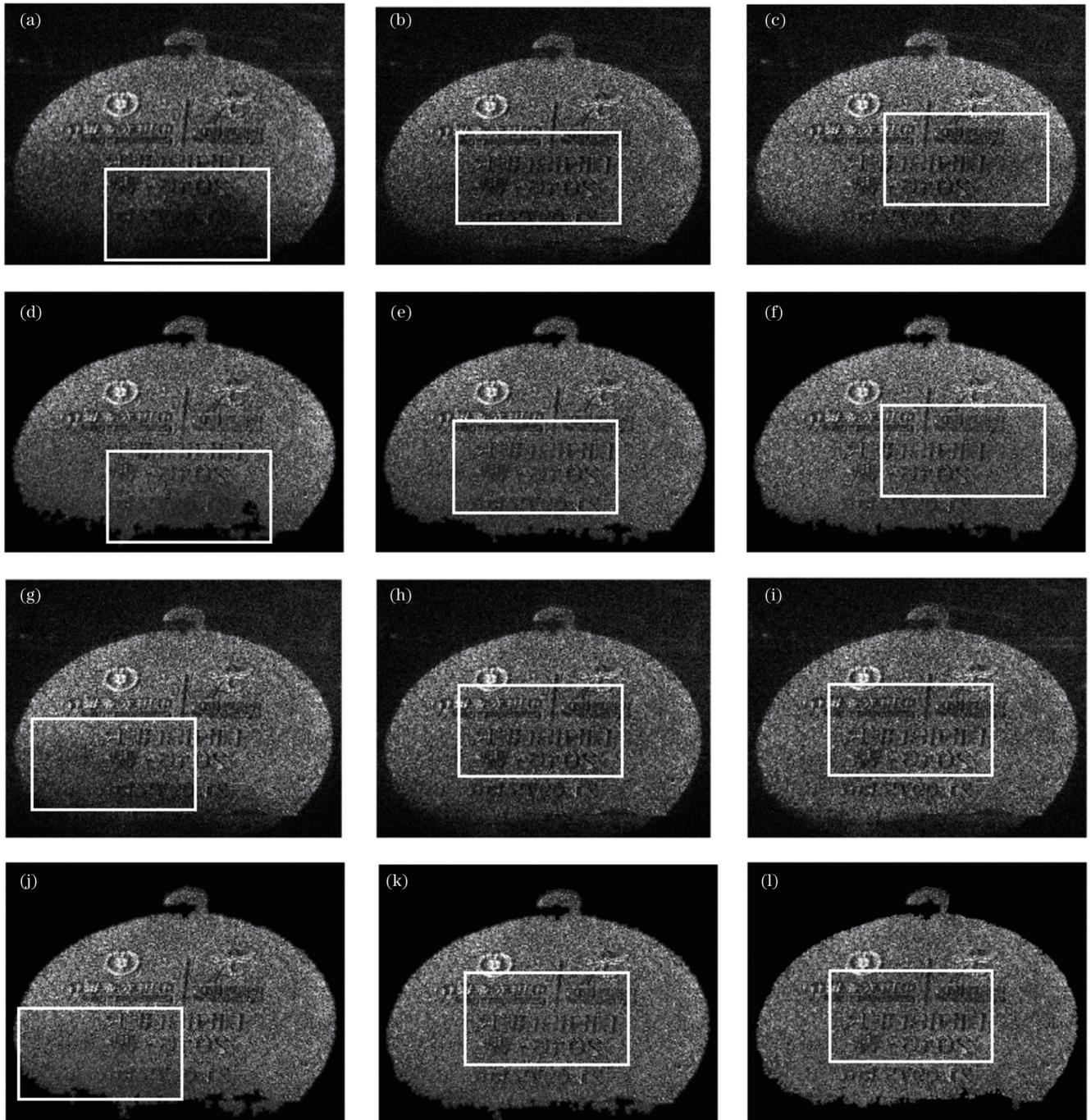


图 10 本文算法处理结果。(a) $t=8$  s 重建像;(b) $t=10$  s 重建像;(c) $t=12$  s 重建像;(d) $t=8$  s 增强像;(e) $t=10$  s 增强像;(f) $t=12$  s 增强像;(g) $t=14$  s 重建像;(h) $t=16$  s 重建像;(i) $t=18$  s 重建像;(j) $t=14$  s 增强像;(k) $t=16$  s 增强像;(l) $t=18$  s 增强像

Fig. 10 Processing results of proposed algorithm. (a)  $t=8$  s reconstructed image; (b)  $t=10$  s reconstructed image; (c)  $t=12$  s reconstructed image; (d)  $t=8$  s enhanced image; (e)  $t=10$  s enhanced image; (f)  $t=12$  s enhanced image; (g)  $t=14$  s reconstructed image; (h)  $t=16$  s reconstructed image; (i)  $t=18$  s reconstructed image; (j)  $t=14$  s enhanced image; (k)  $t=16$  s enhanced image; (l)  $t=18$  s enhanced image

图 10(a)~图 10(c)和图 10(g)~图 10(i)为采集时间间隔为 2 s 的重建像原图,白色矩形框为重建像因烟雾运动而产生的阴影区域;图 10(d)~图 10(f)和图 10(j)~图 10(l)为本文算法处理后的增强像,使用白色矩形框标记出了阴影区域处理后的增强效果。

#### 4.2 图像质量评价

为了验证提出算法的有效性,本文从图像主观质量

评价和客观质量评价两个方面对所提出的算法与其他图像增强算法进行比较。以图 10(a)~图 10(c)的三张红外全息重建图片为例,图 11 给出了四种算法处理对比结果。其中图 11(c)、图 11(g)和图 11(k)给出的是限制对比度自适应直方图均衡化(CLAHE)算法成像效果,显示出对阴影区域亮度增强有一定作用,但其对散斑噪声的去除效果较差,处理后的图像还包含了大量的散斑噪

声。其他两种算法在恢复高强度散斑噪声图像方面有一定效果,但在去除散斑噪声的同时,都会出现整体变模糊的问题,导致大量细节信息丢失。具体而言,文献[19]算法的处理效果如图 11(a)、图 11(e)和图 11(i)所示,此算法对图像的阴影区域并无明显增强效果,层次感较低;文献[22]算法的处理效果如图 11(b)、图 11(f)和

图 11(j)所示,去噪效果相对较好,但图像对比度并未显著提高。以上三种算法各有利弊,但最终的图像质量均不能满足实验要求。本文提出的算法成像效果如图 11(d)、图 11(h)和图 11(l)所示,阴影区域的亮度增强结果理想,且在有效抑制散斑噪声的同时,还明显提升了整体对比度,体现了该算法的有效性。

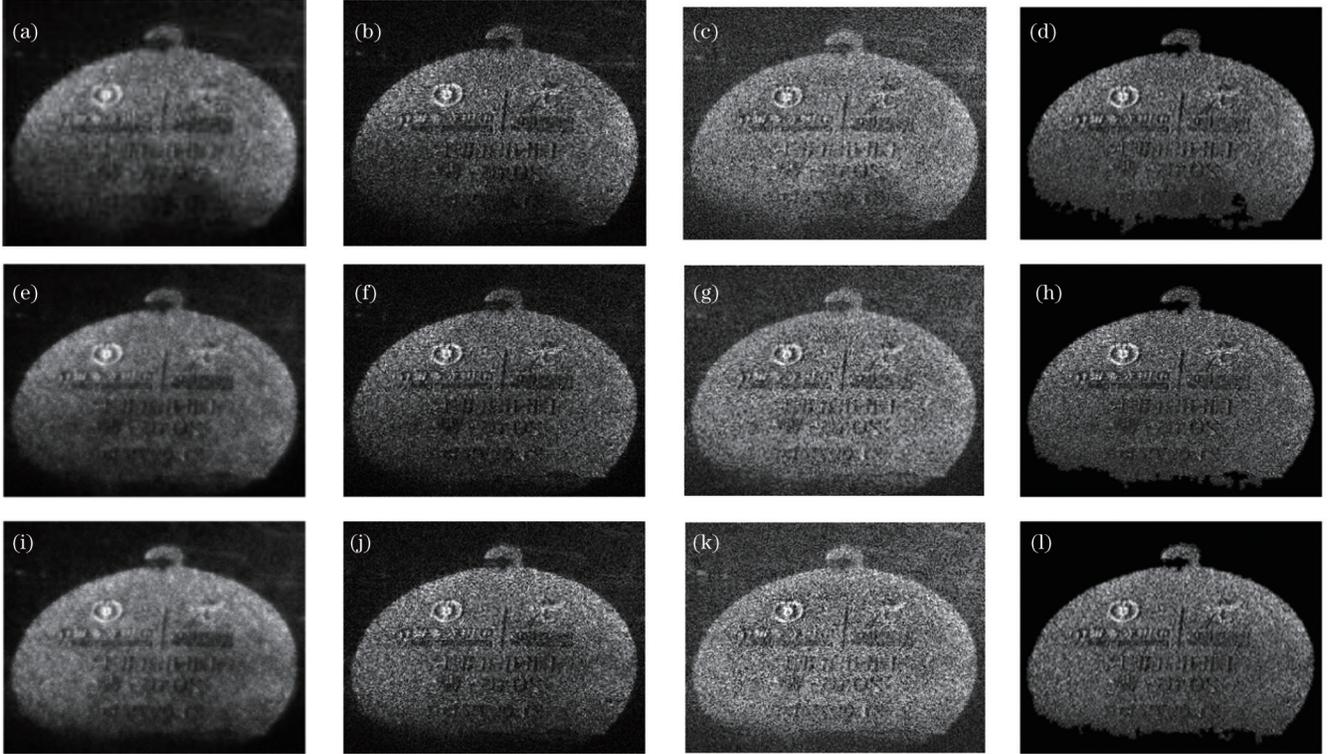


图 11 四种算法效果对比。(a) $t=8$  s, 文献[19]算法;(b) $t=8$  s, 文献[22]算法;(c) $t=8$  s, CLAHE 算法;(d) $t=8$  s, 本文算法;(e) $t=10$  s, 文献[19]算法;(f) $t=10$  s, 文献[22]算法;(g) $t=10$  s, CLAHE 算法;(h) $t=10$  s, 本文算法;(i) $t=12$  s, 文献[19]算法;(j) $t=12$  s, 文献[22]算法;(k) $t=12$  s, CLAHE 算法;(l) $t=12$  s, 本文算法

Fig. 11 Comparison of effects of four algorithms. (a)  $t=8$  s, algorithm in Ref. [19]; (b)  $t=8$  s, algorithm in Ref. [22]; (c)  $t=8$  s, CLAHE algorithm; (d)  $t=8$  s, algorithm in this paper; (e)  $t=10$  s, algorithm in Ref. [19]; (f)  $t=10$  s, algorithm in Ref. [22]; (g)  $t=10$  s, CLAHE algorithm; (h)  $t=10$  s, algorithm in this paper; (i)  $t=12$  s, algorithm in Ref. [19]; (j)  $t=12$  s, algorithm in Ref. [22]; (k)  $t=12$  s, CLAHE algorithm; (l)  $t=12$  s, algorithm in this paper

经过以上实验中图像主观质量评价比较后,为了更全面地验证阴影区域校正效果,采用均方误差(MSE)、峰值信噪比(PSNR)和特征相似度(FSIM)三个指标<sup>[23]</sup>,从图像细节、结构信息等角度来衡量图像质量的好坏。

MSE 与 PSNR 类似,都是通过计算增强图像与未加烟雾重建图像之间像素误差的全局大小来衡量图像质量好坏的。MSE 的值越小,表明图像质量越好。PSNR 通过计算复原图像与参考标准图像的对应像素点全局差异大小来量化图像质量,PSNR 值越大,表明增强图像与未加烟雾重建图像之间的失真程度越小,图像恢复效果越好。这两个评价指标从图像像素值的全局统计出发,未考虑人眼的局部视觉因素,所以对于图像局部质量无从把握。MSE 的计算式为

$$f_{\text{MSE}} = \frac{1}{mn} \sum_{x=0}^{m-1} \sum_{y=0}^{n-1} [\hat{f}(x, y) - f'_s(x, y)]^2, \quad (18)$$

式中: $\hat{f}(x, y)$ 表示大小为  $m \times n$  的未加烟雾全息图重建像; $f'_s(x, y)$ 表示亮度增强后的重建像。

PSNR 的计算式为

$$f_{\text{PSNR}} = 10 \cdot \lg \frac{N_{\text{max}_f}^2}{f_{\text{MSE}}}, \quad (19)$$

式中: $N_{\text{max}_f}^2$ 为图片可能的最大像素值。

为了更全面地评价亮度增强图像的质量,使用 FSIM 进行补充评价。FSIM 主要利用特征相似性进行质量评价,相位一致性特征(PC)可以很好地刻画局部结构,但是有时图像的变化确实会影响观感,所以需要使用梯度特征(GM)来弥补。FSIM 同时使用了 PC 和 GM 两个特征互为补充,它们代表了图像视觉质量的互补方面,可以弥补上文中图像局部质量无从把握的缺陷<sup>[24]</sup>。FSIM 计算方式如下:

$$f_{\text{FSIM}} = \frac{\sum_{X \in \Omega} S_L(X) \cdot f_{\text{PC}_m}(X)}{\sum_{X \in \Omega} f_{\text{PC}_m}(X)}, \quad (20)$$

$$S_L(X) = [S_{\text{PC}}(X)]^\alpha \cdot [S_{\text{GM}}(X)]^\beta, \quad (21)$$

式中： $\Omega$ 表示整个图像空间域； $\alpha$ 和 $\beta$ 是用于调整PC和GM功能相对重要性的参数，通常取1； $S_{\text{PC}}(X)$ 为 $\hat{f}(x, y)$ 和 $f'_s(x, y)$ 的PC相似度量； $S_{\text{GM}}(X)$ 为 $\hat{f}(x, y)$ 和 $f'_s(x, y)$ 的GM相似度量； $f_{\text{PC}_m}(X)$ 为 $\hat{f}(x, y)$ 和 $f'_s(x, y)$ 的PC相似度的最大值。

分别对图11中的12张图片计算评价参数PSNR、

MSE、FSIM，将四种算法结果作对比，如表1所示。分析表1数据可知：本文算法的PSNR值均优于对比算法，且增强图像与未加烟雾重建图像之间的失真程度更小，可较好地保持图像的原有结构，在抑制噪声的同时又达到了亮度均衡的效果；同样地，所提算法的MSE值也是四种算法中最低的，表明其处理后的图像质量较好；所提算法的FSIM值最接近1，表明增强图像与未加烟雾重建图像相似度最高，结构恢复更加完整，失真程度更小。总之，本文的算法适用于存在烟雾运动的红外全息图重建像，利用此算法最终可以获得阴影区域校正效果明显的高质量红外全息重建图像。

表1 图像质量评价参数比较

Table 1 Comparison of image quality evaluation parameters

Image sample	Evaluation indicator	Algorithm in Ref. [19]	Algorithm in Ref. [22]	CLAHE	Proposed algorithm
$t=8$ s	PSNR/dB	12.8472	14.2266	13.0603	22.1124
	MSE	3375.6671	2457.0965	3214.0567	399.8019
	FSIM	0.6676	0.7226	0.7771	0.9521
$t=10$ s	PSNR/dB	12.8380	14.2759	13.0090	22.2017
	MSE	3382.8540	2429.3331	3252.2421	391.6589
	FSIM	0.6772	0.7267	0.7809	0.9511
$t=12$ s	PSNR/dB	12.1628	14.9073	12.4346	21.9866
	MSE	3951.8068	2100.6120	3712.1315	411.5443
	FSIM	0.6946	0.7532	0.7781	0.9615

## 5 结 论

针对透烟雾红外全息重建像散斑噪声严重，且存在亮度不均、物体细节信息缺失以及存在明显的阴影区域等诸多问题，本文提出了一种新的图像亮度增强算法，可有效地提高过烟雾红外全息重建像的图像质量，在亮度增强和去除散斑噪声方面具有显著作用。实验结果表明，与其他算法对比，透烟雾红外数字全息像的亮度增强算法图像增强效果较好，不仅很好地抑制了散斑噪声，还增强了阴影区域的亮度，使图像整体亮度均衡。另外，从图像评价指标上来分析，该算法的PSNR、MSE和FSIM三个指标均优于对比算法，表明其处理图像质量较好。综上所述，本文所提出的算法阴影区域亮度增强效果明显，可对获取的全息图进行智能处理，能有效提高红外全息透烟雾环境成像的图像质量。

## 参 考 文 献

- [1] Ling H J. Three-dimensional measurement of a particle field using phase retrieval digital holography[J]. *Applied Optics*, 2020, 59(12): 3551-3559.
- [2] López F, Sfarra S, Ibarra-Castanedo C, et al. Integration of infrared and optical imaging techniques for the nondestructive inspection of aeronautic parts[J]. *Proceedings of SPIE*, 2015, 9485: 948506.
- [3] 张美娟, 夏海廷, 宋庆和, 等. 多相机数字全息测量物体三维变形方法研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2022, 59(16): 1609001.
- [4] Zhang M J, Xia H T, Song Q H, et al. 3D deformation measurement method of multi-camera digital holography[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2022, 59(16): 1609001.
- [5] Yu N N, Xi S X, Wang X L, et al. Optical implementation of image encryption based on digital holography and computer generated hologram[J]. *Journal of Optics*, 2020, 22(7): 075702.
- [6] 黄奇忠, 杜惊雷, 张怡霄, 等. 计算全息实现信息相干分解及其在图像加密中的应用[J]. *中国激光*, 2000, 27(10): 903-906.
- [7] Huang Q Z, Du J L, Zhang Y X, et al. Implementation of information decomposing using CGH and its application in optical image encryption[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2000, 27(10): 903-906.
- [8] Konishi T, Ito A, Kudo Y, et al. Simultaneous measurement of temperature and chemical species concentrations with a holographic interferometer and infrared absorption[J]. *Applied Optics*, 2006, 45(22): 5725-5732.
- [9] 张璐, 赵春晖, 康森柏, 等. 生物细胞定量相位测量与恢复方法研究进展[J]. *中国激光*, 2018, 45(2): 0207009.
- [10] Zhang L, Zhao C H, Kang S B, et al. Progress on methods of quantitative phase measurement and retrieval for biological cells[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(2): 0207009.
- [11] 钟志, 赵婉婷, 单明广, 等. 远心同-离轴混合数字全息高分辨率重建方法[J]. *物理学报*, 2021, 70(15): 154202.
- [12] Zhong Z, Zhao W T, Shan M G, et al. Telecentric in-line-and-off-axis hybrid digital holographic high-resolution reconstruction method[J]. *Acta Physica Sinica*, 2021, 70(15): 154202.
- [13] 许富洋, 杨鑫, 姚建云, 等. 高分辨率多视点动态全息3D显示[J]. *中国激光*, 2021, 48(1): 0109001.
- [14] Xu F Y, Yang X, Yao J Y, et al. High-resolution multiview dynamic holographic 3D display[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(1): 0109001.
- [15] Locatelli M, Pugliese E, Paturzo M, et al. Imaging live humans

- through smoke and flames using far-infrared digital holography[J]. *Optics Express*, 2013, 21(5): 5379-5390.
- [11] 李俊昌, 桂进斌, 宋庆和, 等. 像面数字全息物体像的完整探测及重建[J]. *光学学报*, 2022, 42(13): 1309001.
- Li J C, Gui J B, Song Q H, et al. Complete detection and reconstruction of object image in image plane digital holography[J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(13): 1309001.
- [12] Hesselink L, Orlov S S. Gated optical recording for nonvolatile holography in photorefractive materials[M]//Boffi P, Piccinin D, Ubaldi M C. *Infrared holography for optical communications. Topics in applied physics*. Heidelberg: Springer, 2007, 86: 41-58.
- [13] 钟杰, 李作友, 刘振清, 等. 测量粒子场的红外激光同轴全息技术[J]. *激光与红外*, 2009, 39(11): 1251-1254.
- Zhong J, Li Z Y, Liu Z Q, et al. Particle field measurement using infrared laser in-line holography[J]. *Laser & Infrared*, 2009, 39(11): 1251-1254.
- [14] Liu N, Yang C. A strong adaptable autofocusing approach of off-axis infrared digital holography under different quality conditions of holograms[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2017, 80: 138-144.
- [15] Liu N, Yang C. Resolution improvement for enhancing interference fringes of digital holograms with near infrared illuminance[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2016, 79: 113-120.
- [16] Liu N, Yang C. The elimination of zero-order diffraction of 10.6  $\mu\text{m}$  infrared digital holography[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2017, 82: 133-139.
- [17] Liu N, Yang C, Cao H. Noise suppression of the reconstruction of infrared digital holography based on pyramid-based bilateral filter[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2017, 85: 352-358.
- [18] 杨超. 红外数字全息图像增强关键技术研究[D]. 南京: 南京邮电大学, 2019: 32-33.
- Yang C. Research on key technologies of infrared digital holographic image enhancement[D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2019: 32-33.
- [19] 柴金燕, 黄晔, 陈春燕, 等. 透火焰红外数字全息图像的分辨率增强算法[J]. *光电工程*, 2019, 46(4): 39-46.
- Chai J Y, Huang C, Chen C Y, et al. Resolution enhancement algorithm based on infrared digital holography imaging through flame[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2019, 46(4): 39-46.
- [20] Ren R Y, Niu S Z. Improvement of image quality of digital holographic reconstruction and development of related systems[J]. *Multimedia Tools and Applications*, 2022, 81(20): 29229-29252.
- [21] Gong J, Li L Y, Chen W N. A fast recursive algorithm for two-dimensional thresholding[C]//Proceedings of Third International Conference on Signal Processing (ICSP'96), October 18, 1996, Beijing, China. New York: IEEE Press, 1996: 1155-1158.
- [22] 孙晓斐, 祁卓, 孙王倩, 等. 基于特征融合的红外图像增强算法[J]. *光学技术*, 2022, 48(2): 250-256.
- Sun X F, Qi Z, Sun W Q, et al. Infrared image enhancement algorithm based on feature fusion[J]. *Optical Technique*, 2022, 48(2): 250-256.
- [23] Xue W F, Zhang L, Mou X Q, et al. Gradient magnitude similarity deviation: a highly efficient perceptual image quality index[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2014, 23(2): 684-695.
- [24] Zhang L, Zhang L, Mou X Q, et al. FSIM: a feature similarity index for image quality assessment[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2011, 20(8): 2378-2386.

## Brightness Enhancement Algorithm for Infrared Digital Holographic Image Through Smoke

Zhao Danlu<sup>1,2</sup>, Zhang Yongan<sup>1,2\*</sup>, He Guanghui<sup>1,2</sup>, Huang Junhao<sup>1,2</sup>, Zhang Yaping<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Faculty of Science, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, Yunnan, China;

<sup>2</sup>Yunnan Provincial Key Laboratory of Modern Information Optics, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, Yunnan, China

### Abstract

**Objective** In recent years, holography has developed rapidly, and has been applied to many scientific and technical fields. It has become a widely used experimental device and light source in three-dimensional (3D) imaging and display. After years of research and development, digital holography in visible wavelengths has become a crucial observation and detection method in the imaging field. However, the limitations of traditional visible light digital holography are becoming more and more obvious in the industrial area, where specific environments with smoke and flame interference exist. Scholars found that the ability of infrared (IR) light to pass through high-density particle fields is significantly higher than that of visible light, and infrared holography can be imaged through smoke and flames. This opens up new applications for holographic technology. However, in the smoke environment, the infrared digital holographic reconstruction image has serious scattering noise and prominent shadow areas, which can no longer meet the requirements for imaging quality. In this study, we propose an algorithm that applies to the reconstructed image of an infrared hologram in the presence of smoke motion. This algorithm can effectively suppress the scattering noise and achieve the effect of brightness enhancement. Thus, high-quality infrared hologram reconstructed images can be obtained using this algorithm.

**Methods** The optical path of this study is designed and built based on the Mach-Zehnder interferometric optical path (Fig. 1). The optical path consists of laser, beam splitter, reflector, collimated beam expansion system, smoke generation device, and light sensor. The hologram acquisition time interval is set to keep the experimental setup stable and acquire 15 samples of infrared holograms under a relatively complete smoke change cycle. The algorithm in this paper is divided into four main steps: image pre-processing, segmentation of the target object, segmentation of the shadow region, and brightness enhancement of the shadow region. The specific algorithm flow is shown in Fig. 4. First, the image is pre-processed using a bilateral filter to remove significant scattering noise. Next, the image is binarized, the image edge information is extracted for expansion and filling operations, and the target object is segmented by combining the maximum connected area algorithm. An edge extraction algorithm and expansion and filling operations

are then used to segment the shadow region from the target object area. Finally, an optimized sparrow search algorithm is used to enhance the shaded areas, and the brightness-enhanced reconstructed infrared holographic image is output.

**Results and Discussions** In this paper, six infrared holograms with significant continuous smoke changes were selected for reconstruction. The brightness enhancement algorithm of infrared digital holograms through smoke was used to enhance the brightness of the shadow region. Finally, the comparison results were obtained between the reconstructed and enhanced images (Fig. 10). We can judge and analyze the enhancement effect from Fig. 10 that the proposed algorithm eliminates the speckle noise of the image and retains the texture details. The shadow region's brightness enhancement effect is obvious. Taking three infrared holographic reconstructed images [Figs. 10(a)–10(c)] as examples, four algorithms are compared (Fig. 11). The comparison shows that although the other three algorithms have their advantages, the final image quality cannot meet the experimental requirements. The proposed algorithm gives the best results. Next, the evaluation parameters including peak signal-to-noise ratio (PSNR), mean square error (MSE), and feature similarity index measure (FSIM) are calculated separately, and the results of the four algorithms are compared (Table 1). The PSNR value of the proposed algorithm is better than those of the other three algorithms, the MSE value is the lowest among the four algorithms, and the calculated FSIM value is also the closest to 1. The results show that the proposed algorithm achieves good luminance enhancement in the shadow region. It can achieve the brightness enhancement effect while suppressing the noise and maintaining the original structure of the reconstructed infrared hologram image with smoke motion.

**Conclusions** The through-smoke infrared holographic reconstruction image has many problems, such as heavy scattering noise, uneven brightness and lack of object detail information. We propose a new image brightness enhancement algorithm, which can effectively improve the image quality of the through-smoke infrared holographic reconstructed image, with significant effects in brightness enhancement and removal of scattering noise. The experimental results show that, compared with other algorithms, the brightness enhancement algorithm of the through-smoke infrared digital holographic image has a better image enhancement effect, suppressing the scattering noise and showing evident brightness enhancement of the shadow region. In addition, from the analysis of image evaluation indexes, it is seen that the PSNR values of the proposed algorithm are all greater than 21, and they are higher than those of the comparison algorithms, indicating that the proposed algorithm has a better noise suppression effect. The MSE values are all less than 411, the smallest among the comparison algorithms, indicating that the image quality after processing by the proposed algorithm is the best. The FSIM values are all greater than 0.9511, the closest to 1. Compared with other algorithms, the results processed by the proposed algorithm have the highest similarity with the reconstructed images without smoke, exhibiting the complete structural recovery and the minor distortion. In summary, the algorithm proposed in this paper has a noticeable brightness enhancement effect in the shadow region, can intelligently process the acquired holograms, and can effectively improve the image quality of infrared holographic imaging in smoke permeable environment.

**Key words** holography; digital holography; image enhancement; infrared imaging; brightness enhancement; sparrow search algorithm