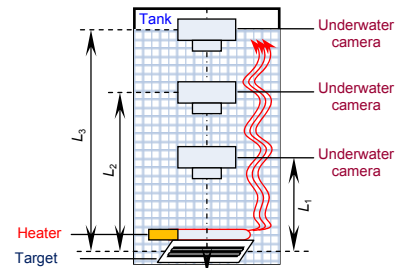




DOI: 10.12086/oe.2019.180438

水下热扰动的光学成像失真问题研究

王从政^{1,2,3*}, 胡松¹, 高椿明², 冯常¹¹中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610209;²电子科技大学光电科学与工程学院, 四川 成都 610054;³中国科学院大学, 北京 100049

摘要: 为了研究水下热扰动环境对光学成像的畸变、模糊等失真问题的影响, 利用水下图像的灰度分布、结构相似性图像度量(SSIM)和归一化最大灰度梯度清晰度评价函数来评价目标图像在径向和轴向上的畸变和模糊等失真程度, 得到水下热扰动对光学成像变化的规律。实验数据表明, 随着成像系统与目标的轴向距离增加, 图像的畸变和模糊程度越来越大。轴向距离 $L_1=500$ mm 时, 对应图像的 SSIM 值优于 0.7, 归一化清晰度值优于 0.8; 轴向距离 $L_3=1500$ mm 时, 对应图像的 SSIM 值低于 0.2, 归一化清晰度值不足 0.6; 此外, 轴向距离 L_1 时, 成像在径向上, 距离发热源越近, 边缘漂移越大, 即成像图像畸变越严重; 最后, 相同轴向和径向条件下, 目标在不同时刻的图像 SSIM 和归一化清晰度值有优劣, 该结论可为后续的水下图像复原提供参考。

关键词: 水下成像; 热扰动; 图像畸变; 图像模糊; 图像评价

中图分类号: TH711

文献标志码: A

引用格式: 王从政, 胡松, 高椿明, 等. 水下热扰动的光学成像失真问题研究[J]. 光电工程, 2019, 46(10): 180438

Study on optical imaging distortion of underwater thermal disturbance

Wang Congzheng^{1,2,3*}, Hu Song¹, Gao Chunming², Feng Chang¹¹Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China;²School of Optoelectronic Science and Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, Sichuan 610054, China;³University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: In order to study the influence of underwater thermal disturbance environment on imaging distortion, such as optical imaging distortion or imaging blur, the level of distortion of target image in radial and axial directions was evaluated by using the gray scale distribution, structural similarity image measurement (SSIM), and normalized maximum gray-scale gradient definition evaluation function of underwater images. Furthermore, the laws of underwater thermal disturbance on optical imaging changes were obtained. Experimental results show that with the increase of the axial distance between the imaging system and the target, the level of image distortion and blurring becomes larger and larger. When the axial distance is equal to 500 mm, the SSIM is better than 0.7 and the normalized definition is better than 0.8. When the axial distance reaches 1500 mm, the SSIM is lower than 0.2 and the

收稿日期: 2018-08-21; 收到修改稿日期: 2018-11-26

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61675206)

作者简介: 王从政(1987-), 男, 博士研究生, 助理研究员, 主要从事特种水下光电检测技术的研究。E-mail: wangcongzheng@ioe.ac.cn

normalized definition is less than 0.6. In addition, when the axial distance equals 500 mm, the drift of the edges will be greater as the imaging area comes closer the heating source in the radial direction, that is, the imaging distortion is more serious. Finally, under the same axial and radial conditions, the conclusion that the SSIM and normalized definition values of the target images are different at different times can provide a reference for further underwater image restoration.

Keywords: underwater imaging; thermal disturbance; image distortion; image blurring; image evaluation

Citation: Wang C Z, Hu S, Gao C M, et al. Study on optical imaging distortion of underwater thermal disturbance[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2019, 46(10): 180438

1 引言

水下光学成像作为水下视觉检测技术的基础,广泛应用于工业、农业、科研等领域^[1-3]。由于水环境会通过吸收和散射^[4]严重衰减用于成像的光线,进而导致水下的图像细节模糊、对比度低等^[5]问题。近几年来,研究人员针对该问题提出大量基于水下成像模型的图像复原方法^[6-8]和用于提升清晰度的图像增强方法^[9-10]。然而,上述方法的研究对象一般处于静态水环境,即水体的折射率相对均匀、稳定,导致成像主要发生散射模糊。当成像光路存在热源、目标自身为发热源、或水体存在其它原因导致湍流扰动时,成像光场非均匀性,水下图像会进一步发生扭曲失真、离焦模糊等。因此,水下热扰动对成像失真问题的研究是十分必要的。

目前,针对水体湍流导致图像退化的研究主要集中在图像复原方法。Wen等^[11]将用于大气湍流的双谱分析技术与幸运块选择相结合,实现扭曲图像的相位保持。王马华等^[12]针对强湍流环境下的模糊图像进行研究,提出基于改进湍流模型和偏振成像相结合的方法,实现水下图像复原。李磊等^[13]提出一种结合序列迭代图像配准和最优块选择的退化图像复原算法,在提升图像清晰度的同时兼顾计算效率。目前,很少有关于热源温度场导致的水体湍流与图像退化规律的研究。部分学者在空气介质中开展过热扰动对成像畸变影响的研究。吴军等^[14]基于图像像素灰度相似程度和位置相似性的方法,进行热源与成像畸变规律的研究。黄战华等^[15]在空气介质中,通过光线追迹算法进行热扰动下的视场角、物距、折射率变化幅度与成像畸变关系的研究。

本文搭建了水下测试平台。首先,在水罐内平移水下成像系统,使其在热源与成像目标形成的轴向上运动,完成目标图像不同距离下的数据获取;然后,分析图像数据的轴向和径向分布特点;最后,对水下

热扰动与成像变化规律进行总结,为后续的水下热湍流环境下的退化图像校正复原提供依据。

2 实验原理

2.1 水下成像热扰动原理

水下光学成像包含诸多影响图像质量的因素,如水和水中杂质的散射、水的吸收、水环境的温度、密度、程辐射等;其中,热源形成的动态温度场和水环境密度非均匀性会造成热扰动现象的出现,即成像光线在水环境中的折射率会实时变化。热扰动水环境中,折射率分布为空间位置、时间和波长的函数。只有当成像距离足够小时,由于光波传播速度高、时间短,热扰动的影响才可忽略。水下成像过程的光学传递函数可由散射、热扰动和程辐射三部分^[16]表示:

$$f_{\text{OTF-total}}(\varphi, r) = f_{\text{OTF-par}}(\varphi, r) \cdot f_{\text{OTF-tur}}(\varphi, r) \cdot f_{\text{OTF-path}}(\varphi, r) \\ = \left(\frac{1}{1+D} \exp \left[-cr + br \cdot \left(\frac{1 - e^{-2\pi\theta_0\varphi}}{2\pi\theta_0\varphi} \right) \right] \exp(-S_n\varphi^{5/3}r) \right), \quad (1)$$

式中: $f_{\text{OTF-par}}(\varphi, r)$ 为散射部分, $f_{\text{OTF-tur}}(\varphi, r)$ 为热扰动部分, $f_{\text{OTF-path}}(\varphi, r)$ 为程辐射部分, θ_0 为平均散射角, D 为程辐射, c 和 b 分别为光束的衰减和散射系数, S_n 为与杂质和波长相关的结构函数, φ 为空间频率, r 为成像距离。

当水体纯净(水体衰减系数优于 0.1 m^{-1}),且成像距离较近(距离低于 1.5 m)时,水体的吸收衰减可忽略,热扰动为成像失真的主要因素,本文以此为依据设计热扰动测试平台,获取数据后进行规律研究。

2.2 像质评价方法

根据热扰动原理,其对成像质量的影响主要体现在两方面,一是对成像内容的畸变,即图像中的高频边缘会发生位置偏移;二是对成像信息的模糊,即图像灰度变化,进而对比度降低。为了评价热扰动对成像失真的影响,文中采用了基于统计学的灰度分布分析、相似性评价和清晰度评价方法。

对于灰度分布,由于扰动使得图像边缘模糊,且动态随机扭曲,基于统计学分析出扰动影响的趋势^[17],为热扰动环境下图像序列的复原和校正提供依据。具体方法为:分割目标图像中的有效区域,进行亮度分量提取,通过联合连续采集的图像中亮度分量的若干有效列数据,可实现灰度分布曲线绘制。

相似性评价方法对于内容畸变的分析,结构相似性图像度量^[18](structural similarity index measurement, SSIM)是一种有效方法,该评价指标包含图像的亮度、对比度和结构,其中,结构占主要比重。

$$S_{SSIM}(I_x, I_y) = l(I_x, I_y) \cdot c(I_x, I_y) \cdot s(I_x, I_y), \quad (2)$$

式中: $l(I_x, I_y) = \frac{2\mu_x\mu_y + c_1}{\mu_x^2 + \mu_y^2 + c_1}$ 为亮度分量,

$c(x, y) = \frac{2\sigma_x\sigma_y + c_2}{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + c_2}$ 为对比度分量,

$s(x, y) = \frac{\sigma_{xy} + c_3}{\sigma_x\sigma_y + c_3}$ 为结构分量; I_x 和 I_y 分别表示参考

图像和待测图像; μ_x 、 μ_y 、 σ_x 、 σ_y 、 σ_{xy} 分别表示图像 x 、 y 的均值、方差和协方差, c_1 、 c_2 和 c_3 为小的正常数,避免分母为 0。

具体方法:对各种轴向距离的无热扰动条件下的参考图像进行采集,作为相似性评价的参考图像;然后,再分别采集各种对应条件下的热扰动连续图像帧作为待测图像;最后,计算所有图像帧的相似性值,可得热扰动对成像畸变的影响曲线。

对于模糊指标,采用基于边缘信息的归一化最大灰度梯度清晰度评价函数^[19],即图像整体像素点的灰度值与参考图的越接近,则模糊程度越小。函数的具体计算方法如下:

基于图 1 的 8 个方向的加权模板可实现目标图像各方向上的梯度图像获取,其中,图 1(a)~1(h)分别表

示 0°、45°、90°、135°、180°、225°、270°和 315°方向的梯度算子,将各梯度算子分别与目标图像进行卷积运算,可得相应的梯度图像。

$$F_i = I \otimes h_i, \quad (3)$$

式中: $i = \{0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ, 180^\circ, 225^\circ, 270^\circ, 315^\circ\}$, F_i 为梯度图像, I 为目标图像, h_i 为梯度算子。然后,对各方向的梯度图像同步进行遍历,获取各梯度图像相应 (m, n) 像素处的最大值,可得目标图像在 (m, n) 像素点的梯度值,用最大灰度梯度图像 $G(m, n)$ 表示为

$$G(m, n) = \max\{|F_i(m, n)|\}, \quad (4)$$

式中: m, n 分别表示最大灰度梯度图像行、列像素位置坐标。

由于 $|F_{0^\circ}| = |F_{180^\circ}|$, $|F_{45^\circ}| = |F_{225^\circ}|$, $|F_{90^\circ}| = |F_{270^\circ}|$, $|F_{135^\circ}| = |F_{315^\circ}|$, 实际运算中,最大灰度梯度图像 G 的获取只需针对图 1(a)~1(d)进行 4 次模板运算。

对最大灰度梯度图像 G 进行阈值分割,降低噪声干扰,得新的最大灰度梯度图像 G' , 然后,构建清晰度评价函数 $V(I)$:

$$V(I) = \frac{1}{M \cdot N} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N G'(m, n), \quad (5)$$

式中: m, n 分别表示图像行、列像素位置坐标, M, N 分别表示图像行、列像素总数。

3 实验过程

为了研究水下热扰动条件对水下光学成像的畸变、模糊等失真问题的影响,设计具有发热源和热对流的实验平台,如图 2 所示。水下成像系统铅垂安装于圆柱形水罐的中心区域,目标板水平置于水罐的底部,与相机的轴线垂直(为保障相机轴线与目标板的垂直,实验前,目标板上放置一个陶瓷标准标定块,进行相机参数标定,再根据内外参数对待运算图像进行校正预处理);发热源通过热水器(交流 220 V 供电,

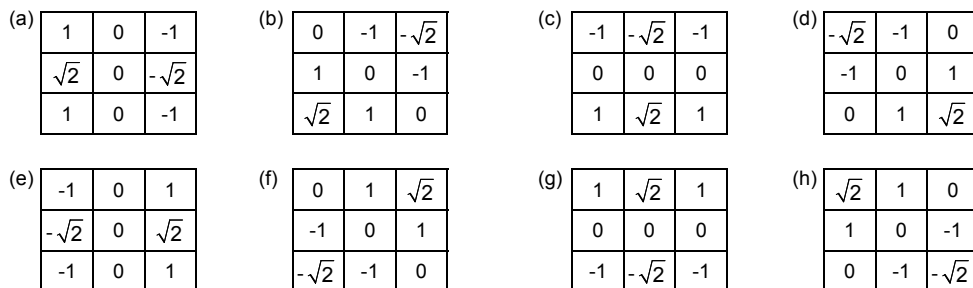


图 1 方向模板图。(a) 0°; (b) 45°; (c) 90°; (d) 135°; (e) 180°; (f) 225°; (g) 270°; (h) 315°

Fig. 1 Direction templates. (a) 0°; (b) 45°; (c) 90°; (d) 135°; (e) 180°; (f) 225°; (g) 270°; (h) 315°

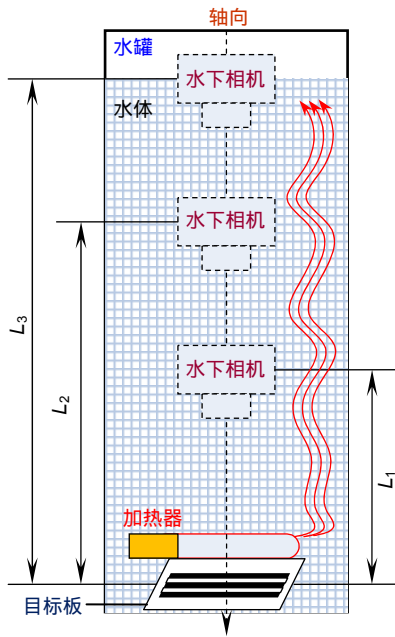


图 2 实验平台结构示意图
Fig. 2 Structure diagram of the experimental platform

功率 1 kW)产生, 其中, 热水器采用 3 台组合的方式实现局部快速加热; 发热源贴于目标板表面, 尽可能大地增加成像系统与热源的距离, 实验中, 可沿轴向移动水下成像系统, 调整相机与目标板的距离(即轴向距离)分别为 L_1 (500 mm)、 L_2 (1000 mm)和 L_3 (1500 mm); 实验平台整体为纵向安装, 便于热流上升, 增大成像路径上的扰动程度; 在三种不同成像距离上, 分别开启发热源, 待扰动程度稳定(即热水器给水体的加热速率与环境对实验水罐中水体的散热速率达到一种相互抵消的状态), 开始目标板上黑白条纹的图像采集。

进行实验时, 实验现场的具体情况如图 3 所示, 其中, 图 3(a)为水下成像系统吊装于实验水罐中的情况, 发热源的电缆通过侧壁引出; 图 3(b)为成像系统的工作示意图, 处理平台通过千兆网接口实现图像数据的捕获, 并进行分析。水下成像系统选用的相机为 MER-503 工业相机, 分辨率: 2448 pixel×2048 pixel, 采集帧频: 20 fps; 选用的目标图像为等宽的黑白条纹, 宽 7 mm, 长 110 mm; 圆柱形水罐内具有刻度线, 精度 0.1 mm, 可实现水下成像系统前端密封玻璃与成像目标距离的设置。

结合实验器材及具体实施条件, 首先, 将水下成像系统与目标图像距离设置为 L_1 , 在发热源开启前连续采集 50 幅图像, 并对图像进行均值处理, 降低水下图像噪声后, 作为该距离条件下的参考图像; 然后, 启动发热源, 并等待扰动程度稳定, 进行目标图像的不断采集, 采集图像数量 200 幅, 作为待处理图像; 接着, 通过处理平台的 Matlab 软件对图像进行分块处理, 分割出若干完整的条纹目标, 应用相关评价方法, 对成像径向上的影响进行分析; 最后, 依次调整实验距离为 L_2 和 L_3 , 分别进行数据采集和扰动的径向成像影响分析, 同时, 联合三种不同距离的数据进行成像轴向上的扰动影响分析, 并总结规律。

4 实验结果与分析

对待处理图像进行分割, 获取相机视场内的有效目标, 成像系统与目标距离 L_1 时的无热扰动采集原图像和有效目标图像如图 4 所示, 扰动平衡状态下的采集图像和对应目标图如图 5 所示, 红色箭头指示方向

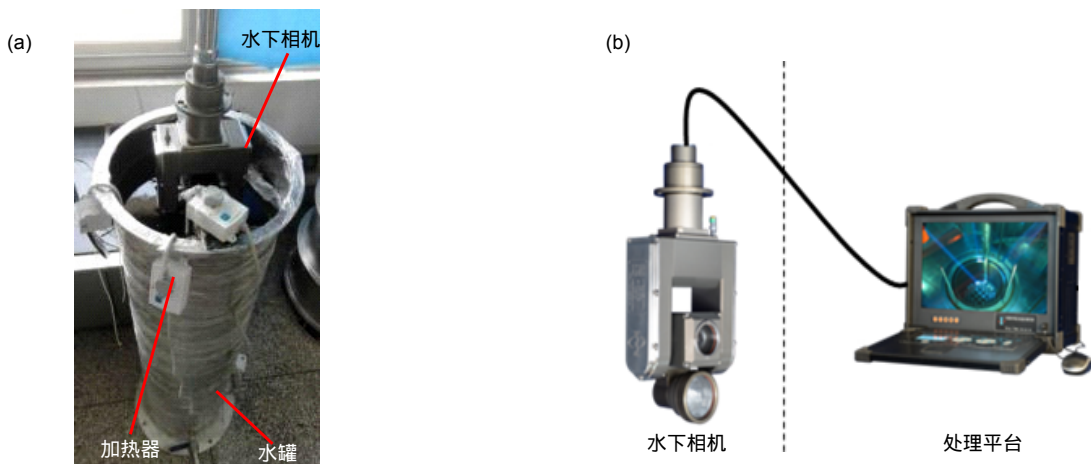


图 3 实验现场图。(a) 实验设备; (b) 成像系统工作框图
Fig. 3 Experimental site. (a) Experimental equipment; (b) Working diagram of imaging system

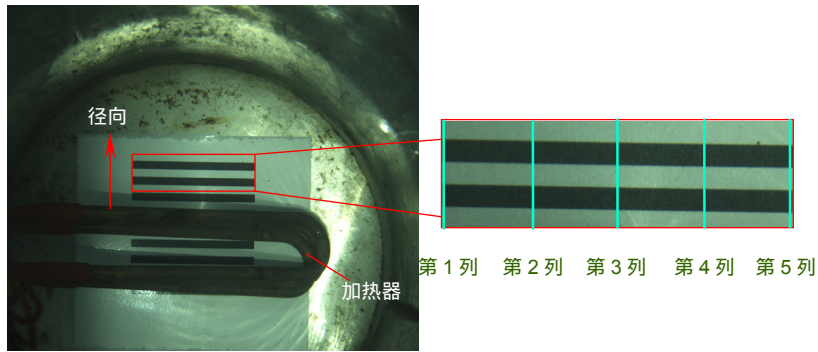


图 4 无扰动成像系统采集图
Fig. 4 Collected image with no thermal disturbance

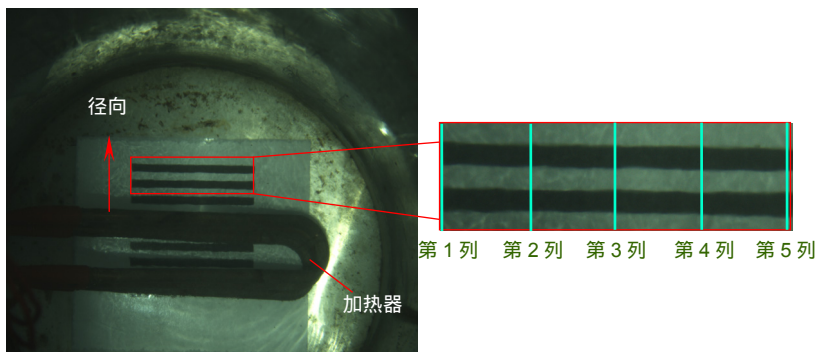


图 5 有扰动成像系统采集图
Fig. 5 Collected image with thermal disturbance

(即径向)为距离发热源越来越远的方向。为了分析成像系统在热扰动环境中的畸变和模糊情况,文中只提取图像的亮度分量进行相关处理。同时,由于 L_2 和 L_3 距离条件下,目标在视场内的尺寸会发生变化,在分析前,对所有采集图像进行等比例剪裁,确保热扰动影响的有效目标一致(距离变化导致视场内目标尺寸变化的处理基于图像配准方法,以 L_1 距离下的无热扰动目标图像为基准,对 L_2 、 L_3 距离条件下的无热扰动采集图像进行图像匹配,获取仿射变换参数,等比例剪裁基于仿射变换对 L_1 、 L_2 、 L_3 距离下采集图像的对应图像坐标转换)。

对于灰度分布,首先,对无扰动图像序列进行均值运算;然后,在条纹的长度方向取 5 列像素点,并采用蓝色线条依次绘制在同一坐标系下;接着,在图像相同坐标位置取像素点,将距离 L_1 条件下的所有图像对应像素点采用红色线条绘制于坐标系中,灰度分布如图 6 所示;最后,针对距离 L_2 和 L_3 的情况进行相同操作,得所有灰度分布分别如图 7、图 8 所示。实验数据表明,由于热扰动的影响,横坐标上的目标条

纹边缘像素位置范围变宽(L_1 距离下宽度不超过 10 个像素, L_2 距离下约 20 个像素, L_3 距离下约 30 个像素),即成像发生畸变;同时,从纵坐标上的目标像素灰度值可知:成像对比度也明显降低(蓝色线条的灰度差值约为绿色线条灰度差值的 1.5~3 倍)。对畸变图像数据进行均值处理,结果如图 6、7、8 中绿色线条所示,其与无扰动情况下图像相似性有明显提升,即均值运算有利于原图复原。

热扰动在轴向上的影响:随着成像路径的增大,成像畸变越来越大。在径向上,第 1 组数据表明,相同 L_1 成像距离的径向上,距离发热源越近,边沿漂移越大,即成像图像畸变越严重;第 2、3 组数据表明,当水下成像系统沿轴向运动至 L_2 、 L_3 距离时,热扰动路径增大,在发热源附近的成像畸变程度均较严重,无明显的径向规律。

以不同成像距离下的无扰动目标图像的均值结果为参考图像,对热扰动条件下获取的失真图像进行结构相似性图像度量计算,以评价图像的畸变情况。不同距离条件下的所有图像的 SSIM 情况如图 9 所示,

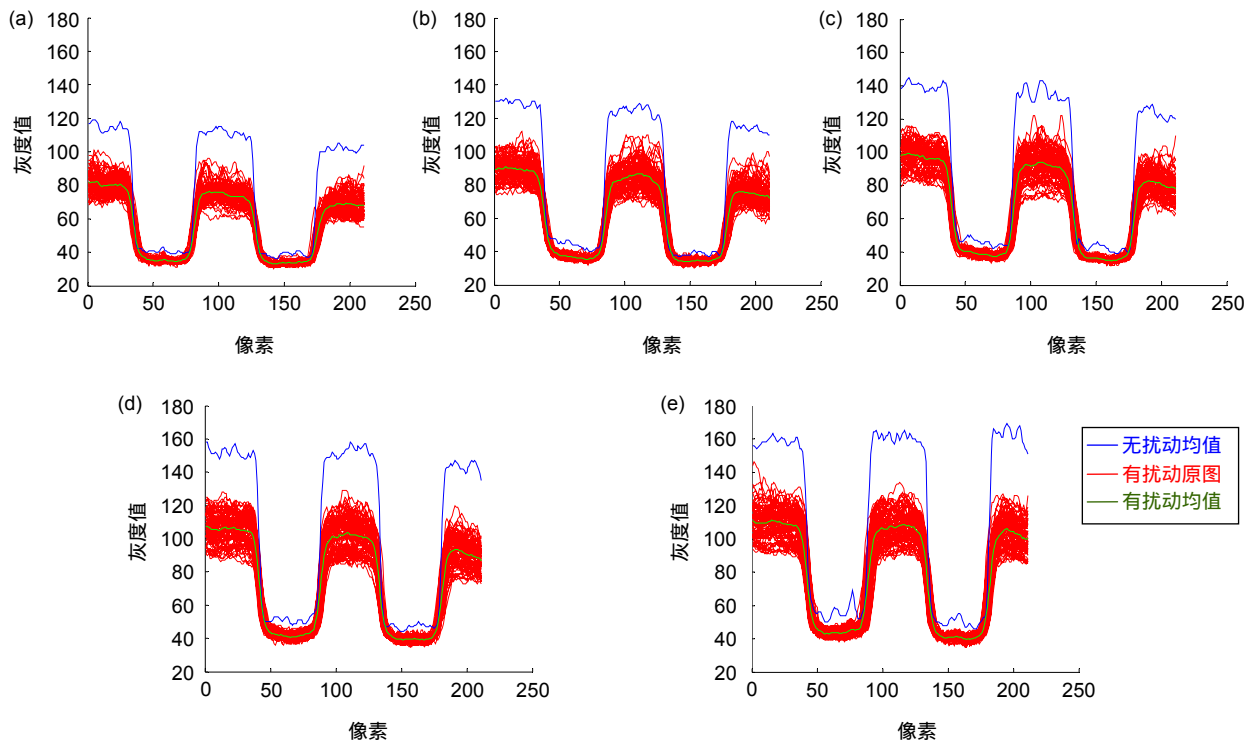


图6 L_1 条件下的灰度分布。(a) 第 1 列; (b) 第 2 列; (c) 第 3 列; (d) 第 4 列; (e) 第 5 列
 Fig. 6 Image gray-scale distributions of L_1 . (a) Column 1; (b) Column 2; (c) Column 3; (d) Column 4; (e) Column 5

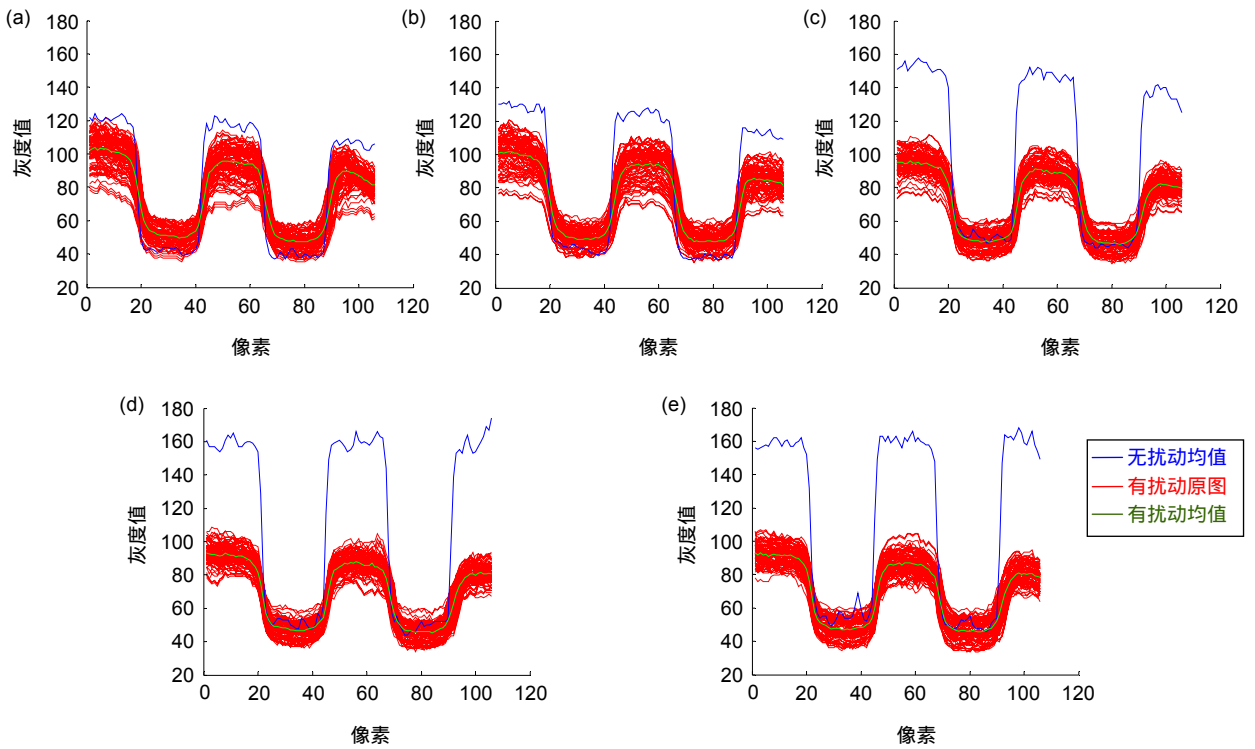


图7 L_2 条件下的灰度分布。(a) 第 1 列; (b) 第 2 列; (c) 第 3 列; (d) 第 4 列; (e) 第 5 列
 Fig. 7 Image gray-scale distributions of L_2 . (a) Column 1; (b) Column 2; (c) Column 3; (d) Column 4; (e) Column 5

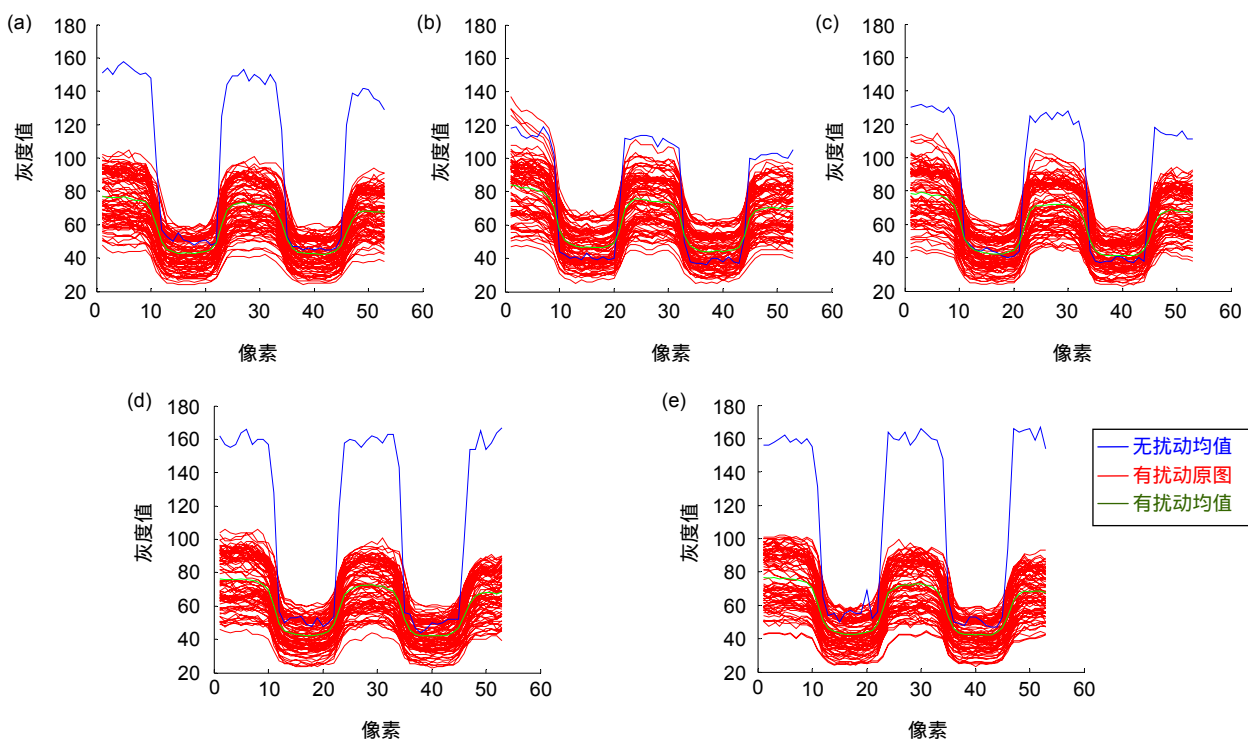


图 8 L_3 条件下的灰度分布。(a) 第 1 列; (b) 第 2 列; (c) 第 3 列; (d) 第 4 列; (e) 第 5 列
 Fig. 8 Image gray-scale distributions of L_3 . (a) Column 1; (b) Column 2; (c) Column 3; (d) Column 4; (e) Column 5

红色(基本处于 0.7~0.9)、绿色(基本处于 0.2~0.6)、蓝色数据(在 0.2 以下)分别对应 L_1 、 L_2 和 L_3 距离下的情况。实验数据表明,随着成像系统与目标的距离增加,SSIM 值会越来越小,即图像的畸变程度变大,与灰度分布法的分析结果一致。其中,水下成像系统与目标距离小于 L_2 时,相同成像距离条件下,SSIM 值并不稳定,在一定范围内波动,对于 L_2 距离下的数据更明显,说明该条件下采集图像中的部分数据与原图数据

更相似,在扰动图像复原中,可给予该类图像更多的权重。此外,对比 L_2 和 L_3 距离下热扰动对目标图像的影响, L_2 条件下采集图像中还存在部分畸变较小的情况, L_3 条件下的 SSIM 值重新趋于稳定且均较小,说明该距离下热扰动导致的畸变使得目标图像细节严重损失,能够图像复原的可能性很低。

对热扰动条件下获取的失真图像进行清晰度评价函数计算,以评价图像的模糊程度。不同距离条件下

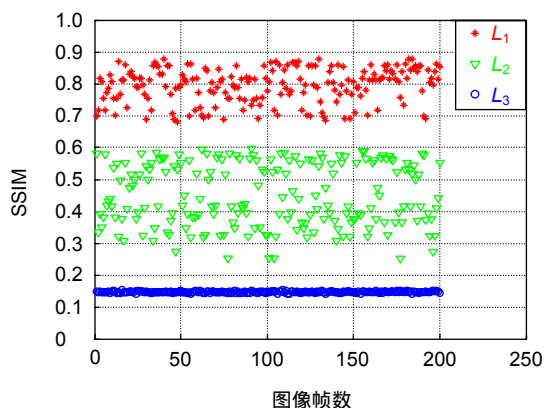


图 9 不同成像距离下结构相似性度量比较
 Fig. 9 Comparison of SSIM among different objective distances

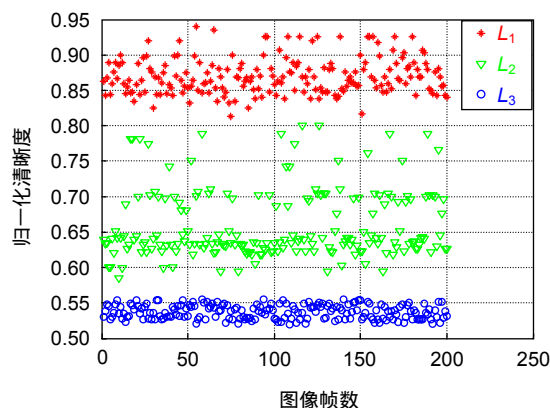


图 10 不同成像距离下清晰度比较
 Fig. 10 Comparison of clarity among different objective distances

的各采集图像的归一化清晰度值如图 10 所示, 红色(基本处于 0.80~0.95)、绿色(基本处于 0.58~0.80)、蓝色数据(在 0.56 以下)分别对应 L_1 、 L_2 和 L_3 距离下的情况。实验数据表明, 随着成像系统与目标的距离增加, 归一化清晰度值会越来越小, 即图像的模糊程度变大, 与前两类方法的分析结果一致。其中, 水下成像系统与目标距离小于 L_2 时, 相同成像距离条件下, 归一化清晰度值也在一定范围内波动, 特别是 L_2 距离下的数据更明显, 说明采集图像中具有更高清晰度值与原图像更相似, 在后续图像复原应用中, 可优先采用该类图像。此外, 对 L_2 和 L_3 距离下的归一化清晰度指标同样进行比较, 情况与 SSIM 分析相同, 热扰动极大降低了目标图像的清晰度。

5 结论

本文根据目标图像特点, 基于水下图像的灰度分布实现热扰动环境下光学成像在径向和轴向上的失真程度的直观评价。同时, 利用结构相似性图像度量进行热扰动图像的畸变程度评价, 利用归一化最大灰度梯度清晰度评价函数评价目标图像的模糊程度。最后, 综合实验结果, 得到水下热扰动对光学成像变化的规律: 1) 随着成像系统与目标的轴向距离增加, 图像的畸变和模糊程度越来越大; 2) 轴向距离 L_1 时, 成像在径向上, 距离发热源越近, 图像边缘漂移越大, 即成像图像畸变越严重, 而轴向距离增至 L_2 或 L_3 时, 径向上结果无明显不同, 均畸变严重; 3) 相同轴向和径向条件下, 目标在不同时刻的图像 SSIM 和归一化清晰度值有优劣, 可通过此方法为进一步的水下图像复原提供预处理, 筛选较优的图像。

参考文献

[1] Gu K, Zhai G T, Yang X K, et al. Automatic contrast enhancement technology with saliency preservation[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 2015, **25**(9): 1480–1494.

[2] Zhang H, Xu Y R, Wan L, et al. Processing method for underwater degenerative Image[J]. *Journal of Tianjin University*, 2010, **43**(9): 827–833.
张赫, 徐玉如, 万磊, 等. 水下退化图像处理方法[J]. *天津大学学报*, 2010, **43**(9): 827–833.

[3] Huang W Y, Xu X M, Wu F Q, et al. Research of underwater binocular vision stereo positioning technology in nuclear condition[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2016, **43**(12): 28–33.
黄文有, 徐向民, 吴凤岐, 等. 核环境水下双目视觉立体定位技术研究[J]. *光电工程*, 2016, **43**(12): 28–33.

[4] Chen Y Z, Ye T, Cheng C J, et al. Degradation and optimal recovery of underwater turbulent imaging[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2018, **45**(12): 180233.

湛雨章, 叶婷, 程超杰, 等. 水下湍流成像退化及优化恢复研究[J]. *光电工程*, 2018, **45**(12): 180233.

[5] Guo J C, Li C Y, Guo C L, et al. Research progress of underwater image enhancement and restoration methods[J]. *Journal of Image and Graphics*, 2017, **22**(3): 273–287.
郭继昌, 李重仪, 郭春乐, 等. 水下图像增强和复原方法研究进展[J]. *中国图象图形学报*, 2017, **22**(3): 273–287.

[6] Galdran A, Pardo D, Picón A, et al. Automatic Red-Channel underwater image restoration[J]. *Journal of Visual Communication and Image Representation*, 2015, **26**: 132–145.

[7] Trucco E, Olmos-Antillon A T. Self-tuning underwater image restoration[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2006, **31**(2): 511–519.

[8] Zhao X W, Jin T, Qu S. Deriving inherent optical properties from background color and underwater image enhancement[J]. *Ocean Engineering*, 2015, **94**: 163–172.

[9] Chiang J Y, Chen Y C. Underwater image enhancement by wavelength compensation and dehazing[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2012, **21**(4): 1756–1769.

[10] Serikawa S, Lu H M. Underwater image dehazing using joint trilateral filter[J]. *Computers & Electrical Engineering*, 2014, **40**(1): 41–50.

[11] Wen Z Y, Lambert A, Fraser A, et al. Bispectral analysis and recovery of images distorted by a moving water surface[J]. *Applied Optics*, 2010, **49**(33): 6376–6384.

[12] Wang M H, Zhao Z M, Wang S H, et al. Restoring method for underwater degraded images based on improved turbulence model and polarization imaging[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, **29**(S1): 203–209.
王马华, 赵正敏, 王士湖, 等. 基于改进湍流模型和偏振成像技术的水下退化图像复原方法[J]. *农业工程学报*, 2013, **29**(S1): 203–209.

[13] Li L, Wang Q, Xiao Z L. Underwater image restoration algorithm from distorted video[J]. *Journal of System Simulation*, 2012, **24**(1): 188–191, 196.
李磊, 王庆, 肖照林. 一种基于视频的水下场景复原算法[J]. *系统仿真学报*, 2012, **24**(1): 188–191, 196.

[14] Wu J, Wang Z J, Xu H T, et al. Study on axial thermal disturbance imaging in vision measurement[J]. *Journal of Applied Optics*, 2018, **39**(2): 235–239.
吴军, 王志军, 徐海涛, 等. 视觉测量中轴向热干扰成像问题研究[J]. *应用光学*, 2018, **39**(2): 235–239.

[15] Huang Z H, Wang B, Chen J J, et al. Impact of variable-refractive-index medium on imaging distortion[J]. *Journal of Tianjin University*, 2006, **39**(6): 708–711.
黄战华, 王蓓, 陈嘉佳, 等. 变折射率介质对成像变形的影响[J]. *天津大学学报*, 2006, **39**(6): 708–711.

[16] Hou W L, Woods S, Jarosz E, et al. Optical turbulence on underwater image degradation in natural environments[J]. *Applied Optics*, 2012, **51**(14): 2678–2686.

[17] Wang C Z, Hu S, Gao C M, et al. Nuclear radiation degradation study on HD camera based on CMOS image sensor at different dose rates[J]. *Sensors*, 2018, **18**(2): 514.

[18] Kanaev A V, Hou W, Restaino S R, et al. Restoration of images degraded by underwater turbulence using structure tensor oriented image quality (STOIQ) metric[J]. *Optics Express*, 2015, **23**(13): 17077–17090.

[19] Hong Y Z, Ren G Q, Sun J. Analysis and improvement on sharpness evaluation function of defocused image[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, **22**(12): 3401–3408.
洪裕珍, 任国强, 孙健. 离焦模糊图像清晰度评价函数的分析与改进[J]. *光学精密工程*, 2014, **22**(12): 3401–3408.

Study on optical imaging distortion of underwater thermal disturbance

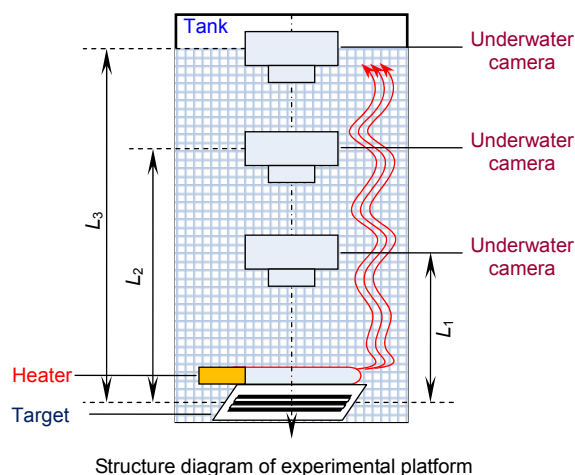
Wang Congzheng^{1,2,3*}, Hu Song¹, Gao Chunming², Feng Chang¹

¹Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China;

²School of Optoelectronic Science and Engineering,

University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, Sichuan 610054, China;

³University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China



Structure diagram of experimental platform

Overview: Underwater optical imaging is widely used in industry, agriculture, scientific research, and other fields. When there are heat sources in the imaging light path, the target itself is a heat source, or there are disturbances caused by other reasons in the water environment, due to the non-uniformity of the imaging light field, image distortion and defocusing will occur in the underwater image. Therefore, it is very necessary to study the problem of imaging distortion under the condition of underwater thermal disturbance.

In order to study the influence of underwater thermal disturbance, an experimental platform with heat sources and thermal convection is designed. The underwater imaging platform can be adjusted along the axis to change the distance between the camera and the target to be L_1 (500 mm), L_2 (1000 mm) and L_3 (1500 mm), respectively. The distortion level of target image is evaluated through the gray scale distribution, structural similarity image measurement (SSIM), and normalized maximum gray-scale gradient definition evaluation function of underwater images. For gray scale distribution, the trend of disturbance influence is analyzed based on statistics, which provides a basis for image sequence restoration and correction under thermal disturbance environment. For SSIM, it is an effective method for image distortion analysis, and its evaluation index includes the brightness, contrast, as well as structure of the image. For the evaluation of the fuzzy index, the normalized maximum gray gradient clarity evaluation function based on edge information is adopted, that is, the closer the gray value of the whole pixel of the image is to that of the reference image, the smaller the ambiguity degree of the image is.

Experimental results show that with the increase of the axial distance between the imaging system and the target, the level of image distortion and blurring becomes larger and larger. When the axial distance $L_1=500$ mm, the SSIM is better than 0.7 and the normalized definition is better than 0.8. When the axial distance $L_3=1500$ mm, the SSIM is lower than 0.2 and the normalized definition is less than 0.6. In addition, when the axial distance is L_1 , the drift of the edges will be greater as the imaging area comes closer the heating source in the radial direction, that is, the imaging distortion is more serious. Furthermore, under the same axial and radial conditions, the conclusion that the SSIM and normalized definition values of the target images are different at different times can provide a reference for further underwater image restoration.

Citation: Wang C Z, Hu S, Gao C M, *et al.* Study on optical imaging distortion of underwater thermal disturbance[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2019, **46**(10): 180438

Supported by National Natural Science Foundation of China (61675206)

* E-mail: wangcongzheng@ioe.ac.cn