

水下目标偏振差分成像模型修正与实现

汪杰君^{1,2}, 梁磊^{1,2}, 李树^{1,2*}, 叶松^{1,2}, 王方原^{1,2}

¹桂林电子科技大学电子工程与自动化学院, 广西 桂林 541004;

²桂林电子科技大学广西光电信息处理重点实验室, 广西 桂林 541004

摘要 针对传统水下偏振差分成像模型在图像处理过程中出现失真的问题, 提出改进的水下偏振差分成像模型。该方法通过增加目标透射光辐射强度的反演过程, 同时引入修正参数, 对目标透射光辐射强度进行校正, 有效避免了传统水下偏振差分成像模型中由全局参量直接反演场景图像造成的图像失真和局部灰度值为负数的情况。利用 FD-1665 偏振成像仪, 开展基于线偏振光主动照明的水下目标成像探测实验, 获取偏振图像数据, 并利用客观图像质量评估参数对处理结果进行对比分析。结果表明, 改进后的模型相较于传统偏振差分模型, 图像对比度提高了 40% 以上, 故改进后的偏振差分成像模型能更有效地识别水下目标。

关键词 成像系统; 偏振成像; 目标探测; 散射; 图像处理; 水下成像

中图分类号 TP212

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201939.1111003

Correction and Implementation of Polarization-Difference Imaging Model for Underwater Target

Wang Jiejun^{1,2}, Liang Lei^{1,2}, Li Shu^{1,2*}, Ye Song^{1,2}, Wang Fangyuan^{1,2}

¹ School of Electronic Engineering and Automation, Guilin University of Electronic Technology, Guilin, Guangxi 541004, China;

² Guangxi Key Laboratory of Photoelectric Information Processing, Guilin University of Electronic Technology, Guilin, Guangxi 541004, China

Abstract This study proposes an improved underwater polarization-difference imaging model to overcome the problem of distortion that occurs in image processing based on conventional underwater polarization-difference imaging model. By this method, the inversion process and correction parameters are introduced for the correction of target forward-scatter intensity, thereby avoiding the image distortion caused by the global parameters' direct inversion and the negative local gray values associated with the traditional underwater polarization-difference imaging model. Using active linear-polarization illumination and underwater-target imaging detection, we obtain the polarization image data with an FD-1665 polarization imager. Using objective image-quality evaluation parameters, we compare multiple sets of experimentally processed images. Results show that the proposed model effectively improves the image-contrast value by more than 40% in comparison with those obtained by the conventional model, indicating the effectiveness of the improved polarization difference imaging model.

Key words image systems; polarization imaging; target detection; scattering; image processing; underwater imaging

OCIS codes 110.5405; 110.0113; 290.1350

1 引 言

水下目标成像探测技术在海洋资源勘探、环境监测、搜救及军事领域有着十分重要的应用价值。

由于自然水体介质对光的吸收和强散射作用, 水下成像存在光照不均匀、获取图像对比度低、图像细节信息易丢失、噪声多等问题^[1-9], 致使有关该领域的技术未能广泛地得到应用。水下光学的偏振效应是

收稿日期: 2019-06-27; 修回日期: 2019-07-15; 录用日期: 2019-07-29

基金项目: 国家自然科学基金(41561079)、广西光电信息处理重点实验室主任基金(GD18104, 18105)、广西自动检测技术与仪器重点实验室主任基金(YQ17106)、广西中青年骨干教师基础能力提升项目(2017KY0192)

* E-mail: lishu_owen@sina.com

水下强散射环境中所衍生出的一种新的信息,它能反映目标形貌取向、表面粗糙度、致密度等材料理化特征^[10],包含丰富物理机制的多参量信息。其信息量大于传统光学成像手段,更有利于提升成像质量。鉴于此,可根据偏振信息的相关特性进行水下目标成像及图像处理来实现场景目标获取。

目前,国内外的研究机构在水下偏振成像技术方面已经开展了大量的研究工作,并且取得一定的成果。以 Schechner 等^[11]的研究为代表的水下偏振差分成像技术,基于正交偏振图像进行算法处理,实现了对水下目标的探测与识别。Foster 等^[12]利用偏振探测计分析光在水下环境的偏振特性,提出一种基于斯托克斯矢量的水下成像模型。Hu 等^[13]基于主动照明探测方式,利用斯托克斯矢量分析圆偏振光在水下的传输特性,实现了对目标的识别。

本文使用 FD-1665 偏振成像仪,通过线偏振光主动照明探测,利用背景散射光同目标信息光之间的光学特性差异,对传统水下偏振差分成像模型进行修正,实现浑浊水下环境图像的复原。实验结果表明,相较于传统水下偏振差分成像方式,改进后的水下偏振差分成像模型能够提供高质量的探测结果,提高了浑浊水体环境下的探测能力。

2 水下偏振差分成像理论基础

2.1 水下偏振差分成像模型

水下偏振差分成像及图像复原模型由以色列理工学院的 Schechner 等^[14]提出。此模型假定水下被测目标物体退偏,探测器所接收到的图像辐射强度可表示为

$$I(x, y) = I_D(x, y) + I_B(x, y) = L(x, y)t(x, y) + A_\infty[1 - t(x, y)], \quad (1)$$

式中: (x, y) 为像素点坐标; $I_D(x, y) = L(x, y) \cdot t(x, y)$, $I_D(x, y)$ 为目标透射光辐射强度; $I_B(x, y) = A_\infty[1 - t(x, y)]$, $I_B(x, y)$ 为后向散射辐射强度; $I(x, y)$ 为探测器接收到的总光强; $L(x, y)$ 为未受水体衰减和散射影响的目标场景辐射强度; A_∞ 为后向散射在无穷远处背景的辐射强度; $t(x, y)$ 为介质透过率。

该模型基于两幅线偏振态相互正交的图像 $I^\parallel(x, y)$ 和 $I^\perp(x, y)$ 来实现目标场景的复原,即

$$I^\parallel(x, y) = \frac{I_D(x, y)}{2} + I_B^\parallel(x, y), \quad (2)$$

$$I^\perp(x, y) = \frac{I_D(x, y)}{2} + I_B^\perp(x, y). \quad (3)$$

由于受到粒子散射作用的光线来自同一方向,因此将光源到散射体和探测器到散射体所形成的平面定义为入射平面。同时将后向散射光分解为垂直和平行于该入射面的两部分 $I_B^\parallel(x, y)$ 和 $I_B^\perp(x, y)$ 。后向散射分量的偏振度 p_B 表示为

$$p_B = \frac{I_B^\parallel - I_B^\perp}{I_B}, \quad (4)$$

式中, $I_B(x, y) = I_B^\parallel(x, y) + I_B^\perp(x, y)$ 。联立(2)式和(3)式可得,向散射强度估计值 $\hat{I}_B(x, y)$ 表示为

$$\hat{I}_B(x, y) = \frac{I^\parallel(x, y) - I^\perp(x, y)}{p_B}. \quad (5)$$

根据(1)式,由 I_B 可得出介质透过率 $\hat{t}(x, y)$ 的表达式为

$$\hat{t}(x, y) = 1 - \frac{\hat{I}_B}{A_\infty}. \quad (6)$$

由此得到目标复原图像 $L(x, y)$,

$$L(x, y) = \frac{I(x, y) - I_B(x, y)}{t(x, y)}. \quad (7)$$

然后后向散射偏振度 p_B 及无穷远处背景辐射强度 A_∞ 作为全局参量,在此处是未知量。因此对于图像的复原,需要进一步估算 p_B 和 A_∞ 。

2.2 全局参量 A_∞ 和 p_B 的估算

通过斯托克斯矢量法的 4 个参量 s_0, s_1, s_2, s_3 , 可以描述任意状态的偏振光,则 $I(x, y)$ 可表示为

$$\begin{cases} s_0(x, y) = I_0(x, y) + I_{90}(x, y) \\ s_1(x, y) = I_0(x, y) - I_{90}(x, y) \\ s_2(x, y) = 2I_{45}(x, y) - s_0(x, y) \\ s_3(x, y) = 2I_C(x, y) - s_0(x, y) \end{cases}, \quad (8)$$

式中: I_0, I_{45}, I_{90} 分别为 $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ 方向线偏振图像; I_C 为圆偏振图像; s_0 为总光强; s_1, s_2 为平行方向及 45° 方向的线偏振光分量; s_3 为圆偏振光分量。一般情况下自然光的圆偏振分量微乎其微,在基于线偏振光主动照明的方式下, s_3 不予考虑,故忽略不计。因此,线偏振度 $p_{l\text{-scat}}$ 表示为

$$p_{l\text{-scat}} = \frac{\sqrt{s_1^2(x, y) + s_2^2(x, y)}}{s_0(x, y)}. \quad (9)$$

由(1)式可知,只有估算出后向散射在背景区域无穷远处的辐射强度 A_∞ 及介质透射率 $t(x, y)$, 才能反演目标场景图像。通过选取局部图像背景散射区域,可计算该区域内辐射强度均值 \hat{A}_∞ ^[13], 表达式为

$$\hat{A}_\infty = \frac{1}{|\Omega|} \sum_{(x, y) \in \Omega} s_0(x, y), \quad (10)$$

式中: $s_0(x, y)$ 为各像素点的辐射强度值; Ω 为所选

区域的像素点数。

同样局部背景散射区域线偏振度 $\hat{p}_{1-\text{scat}}$ 为

$$\hat{p}_{1-\text{scat}} = \frac{1}{|\Omega|} \sum_{(x,y) \in \Omega} \left[\frac{\sqrt{s_1^2(x,y) + s_2^2(x,y)}}{s_0(x,y)} \right], \quad (11)$$

此时使用所求得的局部背景散射区域线偏振度 $\hat{p}_{1-\text{scat}}$ 近似代替图像背景散射区域偏振度 p_B 。依据(10)式和(11)式可得出介质透过率为

$$t(x,y) = 1 - \frac{\sqrt{s_1^2(x,y) + s_2^2(x,y)}}{p_B A_\infty}. \quad (12)$$

最后根据(1)、(7)、(10)~(12)式得到复原后的场景图像为

$$L(x,y) = \frac{p_B s_0 A_\infty - A_\infty \sqrt{s_1^2(x,y) + s_2^2(x,y)}}{\sqrt{s_1^2(x,y) + s_2^2(x,y)}}. \quad (13)$$

2.3 水下偏振差分成像模型的修正

经水下偏振差分成像模型得到的复原图像并不稳定,个别区域中存在有灰度值为负数的情况,同时背景区域噪声较大。此时增加目标透射光辐射强度估算^[8]过程, $I_D(x,y)$ 可估算为

$$\hat{I}_D(x,y) = \frac{\hat{I}(x,y)}{\hat{p}_B} [\hat{p}_B - \hat{P}(x,y)], \quad (14)$$

式中: \hat{p}_B 为图像背景散射区域偏振度估计值; $\hat{P}(x,y)$ 为经斯托克斯矢量法预处理得到的强度图像 s_0 的偏振度估计值。 $\hat{P}(x,y)$ 可表示为

$$\hat{P}(x,y) = \frac{I^{\parallel}(x,y) - I^{\perp}(x,y)}{I(x,y)}. \quad (15)$$

由于所选区域不同, \hat{p}_B 会随所选背景区域的变化而存在轻微变动。当后向散射区域偏振度 \hat{p}_B 估算值过小时,图像就会产生负值。因此引入因子 ϵ 对 \hat{p}_B 进行修正,其中 ϵ 满足 $1 < \epsilon \leq 1/\hat{p}_B$ 。最后根据(1)式、(10)~(12)式、(14)式得到复原后的目标场景图像为

$$L(x,y) = \frac{\hat{I}(x,y) A_\infty [\epsilon \hat{p}_B - \hat{P}(x,y)]}{\epsilon p_B A_\infty - \sqrt{s_1^2 + s_2^2}}. \quad (16)$$

3 水下目标偏振成像实验及结果分析

3.1 实验装置搭建

基于线偏振光主动照明探测成像的实验装置如图1所示。本实验的光源采用全波段可见光氙灯,

同时在光源前放置线偏振片作为起偏器(PSG),用以产生线偏振光。水箱采用PMMA(聚甲基丙烯酸甲酯)材质,规格为215 mm×145 mm×165 mm,注入溶液高度为150 mm。之所以选用PMMA材料制作的水箱,是因为相较于玻璃材质,PMMA的透光率为90%~92%,高聚物PMMA材料内部分子无定形排列,使水箱具有均一的折射率,且其光学性能优良。浑浊溶液的配制使用脱脂牛奶35 mL(分子直径约40 nm)。成像设备采用FD-1665偏振成像仪,该仪器主要由镜头、分光棱镜、线偏振片(0°,45°,90°方向)、CCD探测器组成,该仪器可以同时采集三个偏振方向的偏振图像。CCD探测器使用Sony ICX285AL逐行扫描CCD图像传感器^[15]。被测目标选用带有图案的陶瓷制品、表面光滑的玻璃纤维板、表面锈蚀的云石片刀具,用于模拟实际浑浊水下环境中的目标物体。

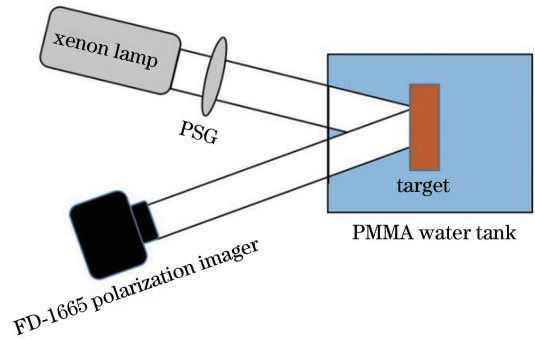


图1 水下成像实验装置原理图

Fig. 1 Schematic of underwater imaging experimental apparatus

3.2 结果分析

图2为经FD-1665偏振成像仪得到的三幅偏振图像,被测目标为带有图案的陶瓷圆盘,将目标浸没在配置的浑浊溶液中,质量浓度为0.74 mg/L。图2(a)~(c)分别表示偏振度方向为0°,45°,90°的图像。

图3为基于得到斯托克斯矢量法预处理后的强度图像 s_0 ,该图像成像质量较差,陶瓷表面图案轮廓不清晰,在图像的细节方面十分模糊,不能识别出目标表面上的文字和黑色五角星内部嵌入图案。此处使用方框在强度图像上截取目标背景的一小块区域,背景区域的选择具有一定随机性。所用氙灯为非均匀光源,光照强度由中心向四周衰弱,尤其在水下浑浊环境中。经过多次实验发现,在选择背景区域时,选择距离光照中心及目标附近的区域,得出的背景辐射强度估计值经过数据处理后,复原图像对



图 2 不同线偏振方向的陶瓷制品图像。(a) 0°; (b) 45°; (c) 90°

Fig. 2 Ceramic images with different linear polarization directions. (a) 0°; (b) 45°; (c) 90°

比度较高。所选背景区域用来估算无穷远处背景的辐射强度 A_∞ ，同时利用斯托克斯矢量估算后向散射的偏振度 $\hat{p}_{1-\text{scat}}$ (其中 $\hat{p}_{1-\text{scat}}$ 近似等于 \hat{p}_B)。利用传统水下偏振差分成像模型对图 3 进行目标场景复原,得到图 4 结果。

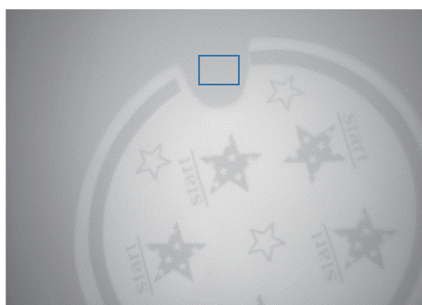


图 3 预处理强度图像

Fig. 3 Pre-processed intensity image



图 4 传统水下偏振差分成像模型复原图像

Fig. 4 Restored image obtained by conventional underwater polarization difference imaging model

从图 4 中可以看到,预处理强度图像中模糊的图像细节有一定程度的恢复。图 5 为修正后模型复原的图像。由于水体吸收和后向散射引起的图像模糊已被消除,图像细节恢复体现在图 5 方框内。在左侧方框内陶瓷目标的左上方有一条微白色的斜线,该线实为固定陶瓷目标的聚乙烯材质框架,它在后向散射消除后显现出来。右侧方框中,五角星内嵌的圆点经过修正模型恢复后,还原了图像细节,表现为一组小五角星。并且“Start”字样也可清晰地识别出来。

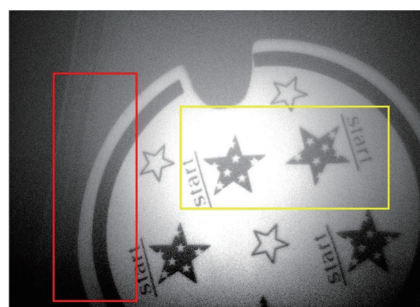


图 5 改进后模型的复原场景图像

Fig. 5 Restored scene image obtained by improved model

对于修正后的模型,引入 ϵ 。修正 $\hat{I}_D(x, y)$ 估算过程中由于 \hat{p}_B 和 A_∞ 估算时会引入误差,以及图像噪声会造成 $\hat{I}_D(x, y)$ 部分灰度值为负, ϵ 的取值需有一定的自由度,应以复原图像质量评估而定。通过实验对 ϵ 范围进行限定,取 $\epsilon \in [1.01, 1.10]$,并对处理后所得图像进行参数评估,结果图 6 所示。

由图 6 可知随着 ϵ 增大,复原图像对比度和平均梯度逐渐降低,使得图像信息熵达到峰值的 ϵ 取值范围在 1.03 至 1.06 之间。当 ϵ 过小则引入的参数失去修正作用; ϵ 过大则图像对比度降低,综上所述故而选定 $\epsilon = 1.05$ 。

为对图 3 预处理强度图像和图 4、图 5 复原后的图像进行标准化对比,使用对比度函数^[16-17]客观地评估图像质量,对比度函数表示为

$$C(I) = \bar{I}^{-1} \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{x,y} [I(x,y) - \bar{I}]^2}, \quad (17)$$

式中: $C(I)$ 为图像对比度函数; N 为总像素值; $I(x, y)$ 为强度图像; \bar{I} 为强度图像的平均强度。

通过(17)式可以得到处理前与处理后图像的对比度,从而对图像效果给予直观评判。同时对信息熵^[18]、平均梯度^[19]等图像质量评估指标进行比较,结果见表 1。其中信息熵是衡量图片信息丰富程度的一个指标,熵越大说明图像所携带的信息越丰富。平均梯度可敏感地反映图像对微小细节反差表达的

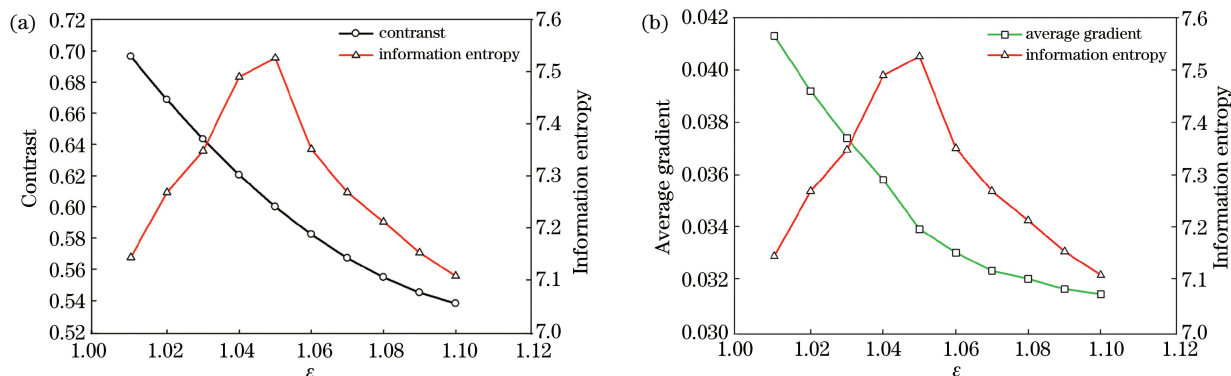


图 6 陶瓷复原图像修正参数 ϵ 估计。(a)修正参数 ϵ 与对比度、信息熵关系曲线;(b)修正参数 ϵ 与平均梯度、信息熵关系曲线
Fig. 6 Estimation of correction parameter ϵ of ceramic restoration images. (a) Relationship among correction parameter ϵ , contrast, and information entropy; (b) relationship among correction parameter ϵ , average gradient, and information

表 1 实验结果对比

Table 1 Comparison of experimental results

| Image | Contrast | Contrast increment /% | Information entropy | Information entropy increment /% | Average gradient |
|--------|----------|-----------------------|---------------------|----------------------------------|------------------|
| Fig. 3 | 0.1524 | | 6.7354 | | 0.0047 |
| Fig. 4 | 0.3757 | 146 | 7.4431 | 10.5 | 0.0178 |
| Fig. 5 | 0.6074 | 298 | 7.5260 | 11.7 | 0.0338 |

能力,其值越大图像层次越多越清晰。表 1 中的“对比度增量”与“信息熵增量”则是以预处理强度图像为基准的对比值,因此预处理图像 Fig. 3 无“对比度增量”与“信息熵增量”数据显示。

由表 1 可知,改进后的成像模型图像复原效果相较于传统偏振差分模型,对比度提高了 61.7%,相较于预处理强度图像,对比度提高了 298%,改进后模型的图像信息熵值更大,同时平均梯度更高。

为验证改进后模型的有效性,选用不同材质和表面粗糙程度的被测目标进行测量,并对两种处理方法进行对比。图 7 的被测目标物体为光滑的玻璃纤维板,表面的字母“A”使用油性墨水绘制。图 8 的被测目标物体为表面带有大量锈迹的云石片切割刀具。

由表 2 数据可知,图像的客观评价数据与表 1

的数据的评价结果一致,改进模型复原后的场景图像相较于传统水下偏振差分成像模型,对比度分别提高了 40.9%和 45.3%,说明本文改进算法的有效性。对比图 7(a)与(c),发现复原后的场景图像中字母“A”更清晰,纤维板右侧边缘的剪切痕迹清晰可见;对比图 7(b)与(c),图 7(c)中书写字母“A”的涂料接缝与涂料重叠等微小细节也得到很好展现。对比图 8(a)与(c),图 8(a)中刀具表面特征模糊,图 8(c)中刀具表面的锈迹清晰可见;对比图 8(b)与(c),图 8(c)刀具轮廓更加清晰,其中刀具左侧豁口清晰可见,刀具顶部豁口呈现效果优于图 8(b)。通过两组实验对比表明,利用改进后的浑浊水体环境下偏振差分场景图像复原方法得到的图像,对比度更高,轮廓更加清晰。



图 7 玻璃纤维板成像对比。(a)预处理强度图像;(b)传统水下偏振差分成像模型的复原图像;(c)改进后的模型的复原图像
Fig. 7 Comparison of glass fiber board imaging. (a) Pre-processed intensity image; (b) image restored by conventional underwater polarization difference imaging model; (c) image restored by improved model

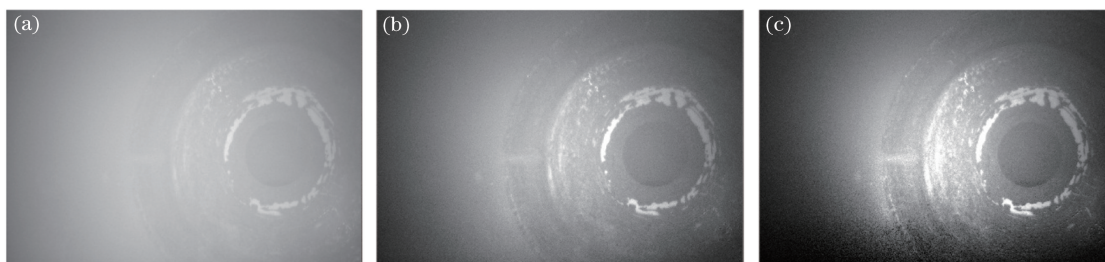


图 8 表面生锈刀片成像对比。(a)预处理强度图像;(b)传统水下偏振差分成像模型的复原图像;
(c)改进后的模型的复原图像

Fig. 8 Comparison of rusty blade imaging. (a) Pre-processed intensity image; (b) image restored by conventional underwater polarization difference imaging model; (c) image restored by improved model

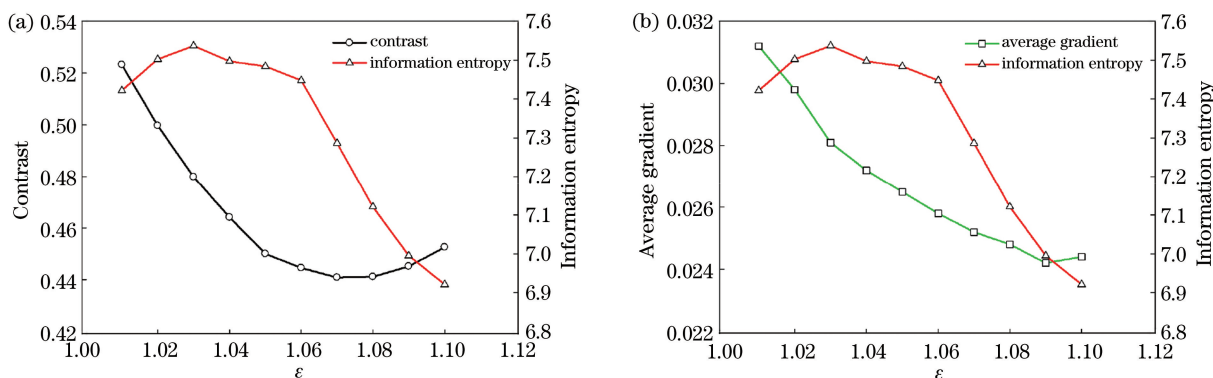


图 9 玻璃纤维板复原图像修正参数 ϵ 估计。(a)修正参数 ϵ 与对比度、信息熵关系曲线;(b)修正参数 ϵ 与平均梯度、信息熵关系曲线

Fig. 9 Estimation of correction parameter ϵ of glass fiber board restoration images. (a) Relationship among correction parameter ϵ , contrast, and information entropy; (b) relationship among correction parameter ϵ , average gradient, and information entropy

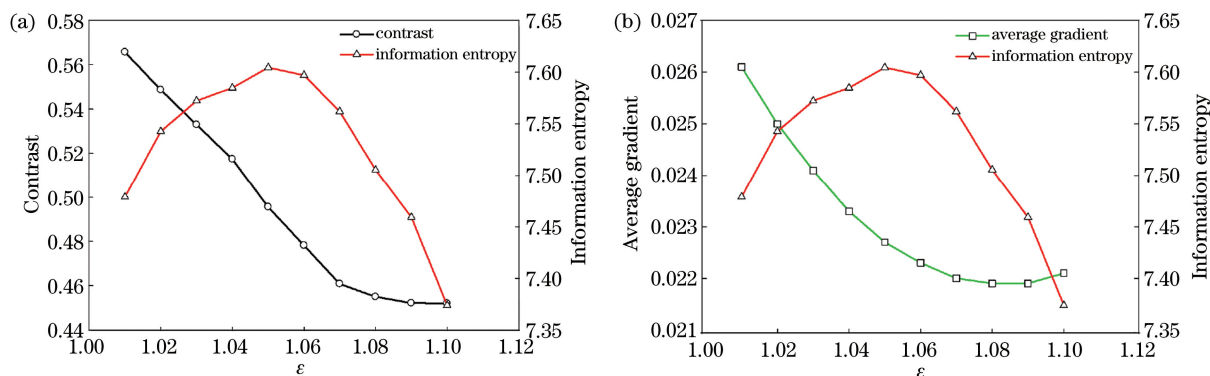


图 10 生锈刀片复原图像修正参数 ϵ 估计。(a)修正参数 ϵ 与对比度、信息熵关系曲线;(b)修正参数 ϵ 与平均梯度、信息熵关系曲线

Fig. 10 Estimation of correction parameter ϵ of rusty blade restoration images. (a) Relationship among correction parameter ϵ , contrast, and information entropy; (b) relationship among correction parameter ϵ , average gradient, and information entropy

表 2 实验结果对比

Table 2 Comparison of experimental results

| Image | Contrast | Contrast increment /% | Information entropy | Information entropy increment /% | Average gradient |
|-----------|----------|-----------------------|---------------------|----------------------------------|------------------|
| Fig. 7(a) | 0.1048 | | 6.0826 | | 0.0043 |
| Fig. 7(b) | 0.3245 | 209 | 7.2476 | 19.1 | 0.0168 |
| Fig. 7(c) | 0.4573 | 336 | 7.4838 | 23 | 0.0269 |
| Fig. 8(a) | 0.1557 | | 6.6513 | | 0.0046 |
| Fig. 8(b) | 0.3486 | 123 | 7.3099 | 9.9 | 0.0146 |
| Fig. 8(c) | 0.5065 | 225 | 7.5931 | 14.2 | 0.0239 |

4 结 论

基于传统水下偏振差分成像模型,通过线偏振光主动照明条件,利用 FD-1665 偏振成像仪,给出浑浊水体环境中偏振成像及图像复原方法。同时针对复原图像出现失真、强度值为负数的问题进行修正。通过对不同材料和表面粗糙程度被测物体的成像效果对比,发现复原后的图像质量效果优于传统的水下偏振差分成像模型。通过对比改进后模型的复原图像、预处理的斯托克斯矢量强度图像、传统成像模型复原图像的对比度、信息熵、平均梯度等参数,客观评价相应图像质量。结论表明改进后的浑浊水下偏振差分成像模型复原的图像质量更高。此方法可为后续浑浊水下偏振成像与图像增强研究提供参考。

参 考 文 献

- [1] Wei Y, Liu F, Yang K, *et al.* Passive underwater polarization imaging detection method in neritic area [J]. *Acta Physica Sinica*, 2018, 67(18): 184202.
卫毅, 刘飞, 杨奎, 等. 浅海被动水下偏振成像探测方法[J]. *物理学报*, 2018, 67(18): 184202.
- [2] Cariou J, Le Jeune B, Lotrian J, *et al.* Polarization effects of seawater and underwater targets [J]. *Applied Optics*, 1990, 29(11): 1689-1695.
- [3] Liu F, Han P L, Wei Y, *et al.* Deeply seeing through highly turbid water by active polarization imaging [J]. *Optics Letters*, 2018, 43(20): 4903-4906.
- [4] Li X B, Hu H F, Zhao L, *et al.* Polarimetric image recovery method combining histogram stretching for underwater imaging [J]. *Scientific Reports*, 2018, 8: 12430.
- [5] Dubreuil M, Delrot P, Leonard I, *et al.* Exploring underwater target detection by imaging polarimetry and correlation techniques [J]. *Applied Optics*, 2013, 52(5): 997-1005.
- [6] Gu Y L, Carrizo C, Gilerson A A, *et al.* Polarimetric imaging and retrieval of target polarization characteristics in underwater environment [J]. *Applied Optics*, 2016, 55(3): 626-637.
- [7] Tonizzo A, Zhou J, Gilerson A, *et al.* Polarized light in coastal waters: hyperspectral and multiangular analysis [J]. *Optics Express*, 2009, 17(7): 5666-5683.
- [8] Hu H F, Zhao L, Li X B, *et al.* Underwater image recovery under the nonuniform optical field based on polarimetric imaging [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2018, 10(1): 6900309.
- [9] Watson J. Underwater visual inspection and measurement using optical holography [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 1992, 16(4/5): 375-390.
- [10] Li J, Zhu J P, Qi C, *et al.* Static Fourier-transform hyperspectral imaging full polarimetry [J]. *Acta Physica Sinica*, 2013, 62(4): 044206.
李杰, 朱京平, 齐春, 等. 静态傅里叶变换超光谱全偏振成像技术 [J]. *物理学报*, 2013, 62(4): 044206.
- [11] Schechner Y Y, Narasimhan S G, Nayar S K. Polarization-based vision through haze [J]. *Applied Optics*, 2003, 42(3): 511-525.
- [12] Foster R, McGilloway A, Ottaviani M, *et al.* Retrieval of the polarized submarine light field from above surface measurements using polarimetric imaging [J]. *Proceedings of SPIE*, 2016, 9853: 98530O.
- [13] Hu H F, Zhao L, Li X B, *et al.* Polarimetric image recovery in turbid media employing circularly polarized light [J]. *Optics Express*, 2018, 26(19): 25047-25059.
- [14] Schechner Y Y, Karpel N. Recovery of underwater visibility and structure by polarization analysis [J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2005, 30(3): 570-587.
- [15] Huang W J. Research on pre-processing methods of dispersive simultaneous imaging polarization camera [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2016.
黄文娟. 三分束同时成像偏振相机预处理方法研究 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2016.
- [16] Zhang W F, Liang J, Ren L Y, *et al.* Real-time image haze removal using an aperture-division polarimetric camera [J]. *Applied Optics*, 2017, 56(4): 942-947.
- [17] Yang L M, Liang J, Zhang W F, *et al.* Underwater polarimetric imaging for visibility enhancement utilizing active unpolarized illumination [J]. *Optics Communications*, 2019, 438: 96-101.
- [18] Zheng J S. An image information entropy-based algorithm of no-reference image quality assessment [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2015.
郑加苏. 基于图像信息熵的无参考图像质量评估算法的研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2015.
- [19] Wang H H, Peng J X, Wu W, *et al.* A study of evaluation methods on performance of the multi-source remote sensing image fusion [J]. *Computer Engineering and Applications*, 2003, 39(25): 33-37.
王海晖, 彭嘉雄, 吴巍, 等. 多源遥感图像融合效果评价方法研究 [J]. *计算机工程与应用*, 2003, 39(25): 33-37.