

基于偏振成像的水下图像复原技术研究最新进展

胡浩丰*, 李校博, 刘铁根

(天津大学 精密仪器与光电子工程学院 光电信息技术教育部重点实验室, 天津 300072)

摘要: 在水下环境中, 悬浮的散射颗粒对光场的散射和吸收作用导致成像清晰度显著下降。基于偏振成像的水下图像复原技术是实现水下清晰成像的有效方法之一。该技术利用散射光的偏振特性, 分离场景光和散射光, 估计散射光强和透射系数, 实现成像清晰化。近年来, 偏振成像技术已广泛、高效地应用于水下图像复原和水下目标识别等诸多领域。水下偏振图像复原技术作为光学成像技术和图像处理技术的交叉领域, 引起了广泛的关注并取得了大量优秀的研究成果。文中主要介绍了基于偏振成像的水下复原技术的基本原理、偏振信息处理方法和最新发展现状, 综述了近年来偏振水下图像复原技术代表性的改进型方法。

关键词: 偏振成像; 水下图像复原; 散射介质成像

中图分类号: O438 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201948.0603006

Recent advances in underwater image restoration technique based on polarimetric imaging

Hu Haofeng*, Li Xiaobo, Liu Tiegeng

(Key Laboratory of Opto-electronics Information Technology, Ministry of Education, School of Precision Instrument & Opto-electronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: The underwater imaging could be severely degraded by the particles in the water due to the backscatter veiling and signal attenuation. The polarimetric image recovery method is one of the most effective way to enhance the quality of underwater imaging. Based on the polarization property, the polarimetric method can separate the target intensity from the backscattering, estimate the intensity of backscattering and medium transmittance, and then realize clear imaging. In recent years, polarimetric imaging technique has been applied to many fields more efficiently and extensively, such as underwater image restoration and target recognition, etc. As an intersection of optical imaging technique and image processing technique, the polarimetric recovery method for image restoration has aroused a wide concern and gained fruitful research results. In this paper, we mainly introduced the basic principle of underwater image restoration technique based on polarimetric imaging and the methods of polarization information processing. We also reviewed the recent advances of representative improved approaches in underwater image restoration technique based on polarimetric imaging.

Key words: polarimetric imaging; underwater image restoration; imaging in scattering media

收稿日期: 2019-02-10; 修订日期: 2019-03-20

基金项目: 国家自然科学基金(61775163); 中国科协青年人才托举工程项目(2017QNRC001)

作者简介: 胡浩丰(1985-), 男, 副教授, 博士, 主要从事偏振成像、偏振测量和光纤传感等方面的研究。Email: haofeng_hu@tju.edu.cn

通讯作者: 刘铁根(1955-), 男, 教授, 博士, 主要光纤传感、偏振光学等方面的研究。Email: tgliu@tju.edu.cn

0 引言

水下图像作为研究水下世界的主要信息载体对于水下能源勘测、水下生态环境监测保护、水下军事等诸多领域的研究有着重要作用^[1-3]。然而,传统的光学成像系统所获取的图像受水中散射微粒的影响,有效的信号信息被吸收和散射,导致水下图像的清晰度和系统的能见度显著降低,严重影响了后续对水下目标的识别和分析^[4-6]。因此,有效复原水下图像、提高图像清晰度成为亟待解决的热点、重点问题^[7-9]。

目前,实现水下图像复原,提高成像清晰度的方法主要包括图像处理复原技术和光学复原技术^[9-12]。其中现有的基于数字图像处理的复原技术主要通过单幅图进行处理,实现场景信息的复原^[12-18]。该类方法主要包括图像增强技术和图像复原技术。图像增强技术不考虑图像清晰度降低的原因,旨在提升目标对比度。该技术往往算法简单、处理速度快、效果明显,因此适用范围较广。但该技术受拍摄条件和环境的影响较大,对目标细节的恢复能力有限。典型的增强技术有直方图均衡技术^[10]、频域变换技术^[13]等。图像复原技术基于物理退化模型,依靠先验知识和前提假设等估计影响图像清晰度的干扰因子,通过反退化过程,消除干扰因子影响,提高图像清晰度。该方法可获得较高质量的复原图像,但算法一般复杂耗时,且在强散射介质下复原效果受限。典型的复原技术有暗通道先验技术^[16-17]、多通道融合技术^[18-19]等。

与基于数字图像处理的复原技术不同,基于光学手段的图像复原技术更侧重于光学成像系统及光学信息的获取和处理。该类典型方法包括多光谱融合复原^[20]、偏振光学成像复原^[21-34]等。其中基于偏振成像的复原技术作为最有效的光学复原方法之一,可有效抑制背向散射光实现图像清晰度提升。随着探测距离的增大,场景光光强衰减且其偏振信息几乎消失,而背向散射光光强增大且具有明显的偏振特性^[21,24]。偏振复原技术通过采集同一场景的不同偏振图像,进行差分处理或准确估计出背向散射光的偏振特性,反演出散射光强和透射系数等,实现抑制散射光,提升图像清晰度的目的^[21-22]。此外,由于雾

霾、沙尘等散射介质散射日光形成的散射光也具有部分偏振特性,因此偏振复原技术适用于各类散射介质环境,适用范围广,具有算法简单快速、细节保真度高等特点^[25-27]。特别是在高浓度散射介质下尤其具优势^[10,22]。

文中针对水下成像系统的特点,介绍了基于偏振成像的水下图像复原技术的基本原理和偏振信息处理方法。并针对高偏振度物体、高浓度散射介质、非均匀光场等传统偏振复原方法失效或低效的水下散射场景,综述了近年来偏振水下图像复原技术代表性的改进型方法。

1 水下偏振复原技术

在浑浊水下,探测器接收到的光辐射主要来自散射介质的背向散射光与来自目标的场景光组成^[21,27]。现有的基于偏振成像的水下图像复原技术主要分为两类。一类是基于偏振差分成像的水下图像复原方法^[32-34]。该方法利用两个正交线偏振图像之间的差异抑制背向散射光,从而实现对物体的识别和探测。另一类是基于物理退化模型的偏振图像复原方法^[20-21,24]。该方法通过采集同一场景在不同偏振态下的偏振图像^[27-30],准确估计出背向散射光的偏振特性(如偏振度^[27],偏振角^[21]等),反演退化过程,得到散射光强和透射系数等,实现场景光和散射光的分离,进而实现图像清晰度提升。

2 基于偏振差分的水下复原技术

偏振差分水下复原技术基于背向散射光与场景光的偏振性差异对背向散射光进行共模抑制,以此建立利用偏振差分方法进行水下目标探测与识别的物理模型^[32-34],如图 1 所示。图中,背景光为 B ,偏振方向角度为 α ,目标光为 T ,偏振方向角度为 β ,背景光偏振方向与相互正交的检偏器(P_1, P_2)的透过方向均为 45° 。

根据马吕斯定律可知,当背景光偏振方向与相互正交的检偏器透过方向均为 45° 时,偏振差分成像通过光学检偏器的共模抑制作用来滤除背向散射光。参考文献[34]提出的传统偏振差分方法通过检偏器的机械旋转得到差分图像:

$$I_{pd} = I_{//} - I_{\perp} \quad (1)$$

式中： $I_{//}$ 和 I_{\perp} 分别为偏振方向相互正交的强度分布图。

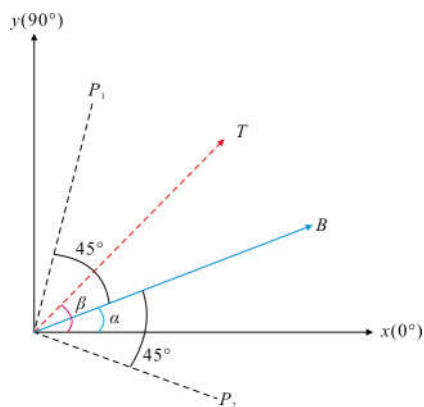


图 1 偏振差分成像探测原理

Fig.1 Detection principle of polarization difference imaging

Stokes 矢量 $[I, Q, U, V]^T$ 是完备描述光束偏振态的表征方法，其中 I 表示光强， Q 代表水平与垂直偏振方向光的强度差值， U 代表 45° 与 135° 偏振方向光的强度差值， V 代表右旋偏振光与左旋偏振光的强度差值。光矢量的振动方向可用偏振角 $\varphi = 1/\arctan(U/Q)$ 来表示，现有的偏振成像系统可以实现实时 Stokes 矢量的获取^[35-36]。参考文献[32]提出了一种改进的、基于 Stokes 矢量的计算偏振差分成像方法如下：

$$I_{\text{stokes-pd}} = Q - \gamma U \quad (2)$$

式中： γ 为权重系数。该方法与传统的偏振差分系统信息处理过程的比较如图 2 所示。基于 Stokes 矢量的计算偏振差分方法对 Stokes 矢量中的线偏振元

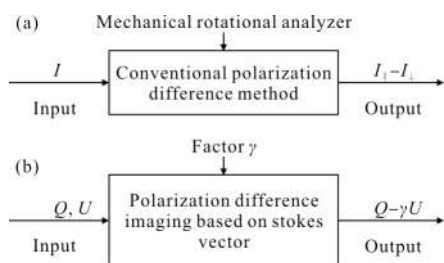
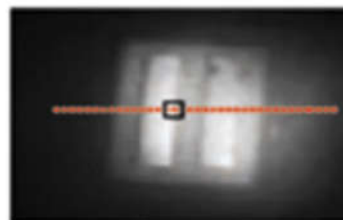


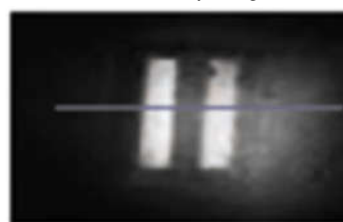
图 2 (a)传统的偏振差分方法与(b)基于 Stokes 矢量的计算偏振差分成像信息处理过程的比较^[32]

Fig.2 Comparison of information processing using (a) conventional polarization difference method and (b) computational polarization difference imaging based on Stokes vector

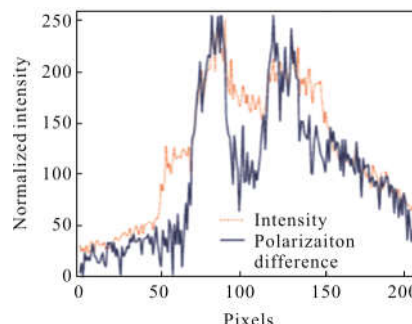
素进行快捷的程序处理计算得到偏振差分图像，从而可以实现对水下目标的复原和识别，在理论上实现了实时的偏振差分成像(效果如图 3 所示)。



(a) 光强度图像
(a) Intensity image



(b) 偏振差分成像
(b) Polarization-difference imaging



(c) 数值曲线^[32]
(c) Number curves

图 3 光强图像与基于 Stokes 矢量的计算偏振差分图像比较

Fig.3 Comparison of intensity image and computational polarization-difference image based on the Stokes vector

3 基于物理退化模型的偏振复原技术

3.1 基于偏振成像的水下物理退化模型

偏振差分复原方法虽然简单有效，但图像细节的复原度较低，对于低偏振度(DOP)的物体复原效果不佳，较难适用于复杂场景下的目标复原和识别。2005 年，以色列的 Schechner 等^[21]提出了水下散射环境中基于物理退化模型的偏振复原方法，该方法对复杂场景下依然具有显著的复原效果，经过多年

的发展和完善已经成为水下图像复原的一个重要的、成熟的分支,其基本原理如图 4 所示。

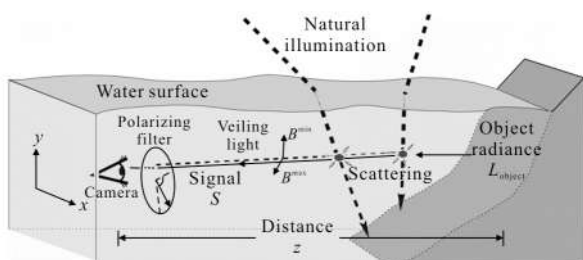


图 4 水下环境中偏振成像基本物理模型

Fig.4 Basic physical model of polarimetric imaging in underwater environment

在探测散射介质中的目标时,探测器获得的光大致分为两部分。第一部分为目标物体的反射光,这部分光信号在进入探测器过程中受散射粒子的吸收和散射作用发生衰减:

$$D(x, y) = L(x, y)t(x, y) \quad (3)$$

$$t(x, y) = \exp[-\beta(x, y)\rho(x, y)] \quad (4)$$

式中: (x, y) 为图中像素的坐标; $L(x, y)$ 为未经过散射粒子衰减的物体反射光; $t(x, y)$ 为介质的透过率; 参数 $\beta(x, y)$ 为水中散射粒子的衰减函数, 在水下散射介质环境中, 一般假设此衰减系数为常数^[27], 即 $\beta(x, y) = \beta_0 \rho(x, y)$; $\rho(x, y)$ 为目标物体到探测器的距离。

另一部分光信号为经散射粒子散射后进入探测器的杂散光, 称之为背向散射光。如图 4 中的散射光所示, 散射粒子将入射的部分光信号通过散射的方式进入探测器, 造成探测的图像中附加一层“雾”, 从而导致图像质量的下降, 这部分背向散射光的表达式为:

$$B(x, y) = A_\infty [1 - t(x, y)] \quad (5)$$

式中: A_∞ 为在水下视场中延伸到无穷远处的背向散射光的强度。一般认为水下散射介质环境中, 由散射粒子引起的背向散射光的偏振特性是部分偏振的, 探测到的总光强为:

$$I(x, y) = D(x, y) + B(x, y) \quad (6)$$

根据以上的公式, 可计算得到透过率 $t(x, y)$ 和实际物体反射光 $L(x, y)$ ^[21, 27]:

$$t(x, y) = \frac{B(x, y)}{A_\infty} \quad (7)$$

$$L(x, y) = \frac{I(x, y) - A_\infty [1 - t(x, y)]}{t(x, y)} \quad (8)$$

传统的基于偏振成像的图像复原技术利用正交偏振图像的差异性来实现图像复原, 即通过将探测器前的检偏器(偏振片)分别调制到两个正交状态, 得到同一场景的两幅正交偏振图像 I^{\parallel} 和 I^{\perp} (如图 5 所示)。总光强图像可表示为:

$$L(x, y) = I^{\parallel}(x, y) + I^{\perp}(x, y) \quad (9)$$

其中检偏器为水平方向时获得的图像 I^{\parallel} 和检偏器为垂直方向时获得的图像 I^{\perp} 分别为:

$$I^{\parallel}(x, y) = D^{\parallel}(x, y) + B^{\parallel}(x, y) \quad (10)$$

$$I^{\perp}(x, y) = D^{\perp}(x, y) + B^{\perp}(x, y) \quad (11)$$

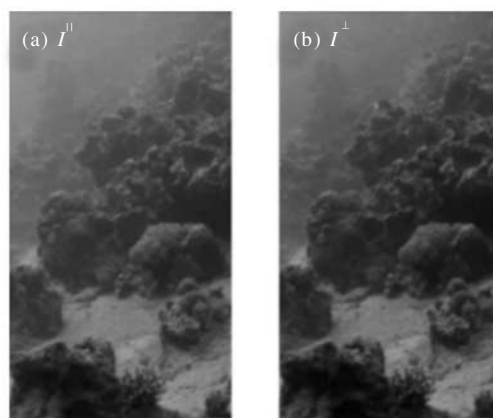


图 5 同一水下场景的正交偏振图

Fig.5 Orthogonal polarization images for same scene

Cariou 等^[26]研究发现, 背向散射光的偏振方向接近于入射的线性偏振光的偏振方向, 因此背向散射光的偏振度可被描述为:

$$P_{\text{scat}}(x, y) = \frac{B^{\parallel}(x, y) - B^{\perp}(x, y)}{B^{\parallel}(x, y) + B^{\perp}(x, y)} = \frac{\Delta B(x, y)}{B(x, y)} \quad (12)$$

$$\Delta B(x, y) = \Delta I(x, y) - \Delta D(x, y) \quad (13)$$

式中: $\Delta I(x, y)$ 和 $\Delta D(x, y)$ 分别表示探测器获得的总光强及物体反射光强的偏振差分图像。由此, 可得到水下透过率 $t(x, y)$ 的表达式为:

$$t(x, y) = 1 - \frac{\Delta I(x, y) - \Delta D(x, y)}{P_{\text{scat}} A_\infty} \quad (14)$$

传统的偏振复原方法假设背向散射光为部分偏振光且物体反射光为非偏振光(即 $\Delta D(x, y) = 0$), 得到

的复原图像如图 6 所示。



图 6 图 5 场景的复原图像

Fig.6 Recovered image for the scene in Fig.5

在实际中,由于水下环境中的衰减系数较大,自然光照较弱且不满足成像要求。因此,采用主动照明的方式可有效解决水下成像的上述问题,被广泛应用于各类水下成像系统。基于主动线偏振光照明的水下偏振成像实验装置如图 7 所示。通过在光源后安置一个固定角度的线偏振片,实现主动偏振照明,能提高场景背向散射光的偏振度,更有利于抑制散射光、提高图像清晰度。然后通过旋转 CCD 相机(探测器)前的线偏振片到不同的偏振方向(与前一个偏振片的角度平行或垂直),获得不同偏振状态下的偏振图像。

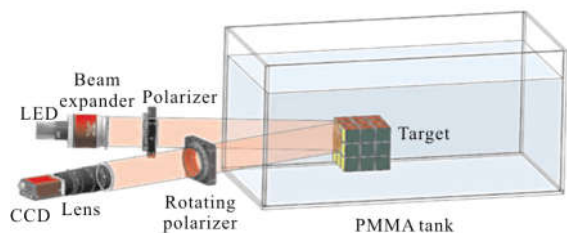


图 7 主动线偏振照明水下偏振成像实验装置图

Fig.7 Underwater polarimetric imaging experimental setup based on active lineal polarized illumination

基于物理退化模型和偏振成像的水下复原技术在提出以后经过多年的优化和完善,一方面,现已发展为一种较为成熟的水下图像复原技术,其应用领

域得到了显著的拓展。另一方面,改进后的模型及其偏振信息处理算法可有效解决传统偏振复原方法的主要缺陷:

- (1) 实现不了场景中高偏振度(低退偏)物体的复原;
- (2) 高浓度散射环境下复原失效;
- (3) 非均匀光场环境下复原效果差。

3.2 针对高低偏振度物体的水下图像复原技术

传统的基于物理退化模型的偏振复原技术只能实现低 DOP 物体(例如:木制品、石头、塑料等)的复原,此情况下物体反射光的 $\Delta D(x, y)$ 可忽略不计。但当被探测物体为高 DOP 物体时(例如:金属、光滑物体等), $\Delta D(x, y)$ 不能忽略^[24]。传统的算法会造成估计透过率 $t(x, y)$ 时出现无法忽略的误差,从而导致高 DOP 物体处复原失败(如图 8(b)所示)。

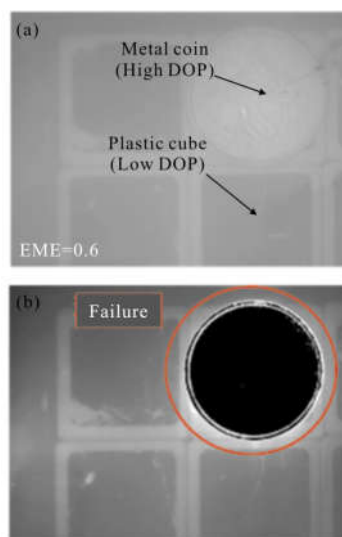


图 8 (a)场景光强图像;(b)Schechner 方法复原图

Fig.8 (a) Intensity image of the scene; (b) Recovered image by Schechner's method

Huang 等在参考文献[23]中引入中间变量 $K(x, y)$ 和偏振正交差分信号 $\Delta D(x, y)$ 的关系(如图 9 所示),并提出一种基于曲线拟合优化该关系实现估算目标偏振正交差分信号的新方法,从而正确地推导出散射环境中的透过率,实现了浑浊水下对高低 DOP 物体的同步复原。如图 10 所示,相比于原始光强图,该方法将图像清晰度(EME 值)从 0.6 提升到 2.3,显著提高了图像清晰度。无论是对于低 DOP 物体(塑料魔方)还是高 DOP 物体(金属硬币)均具有清晰的复原效果。

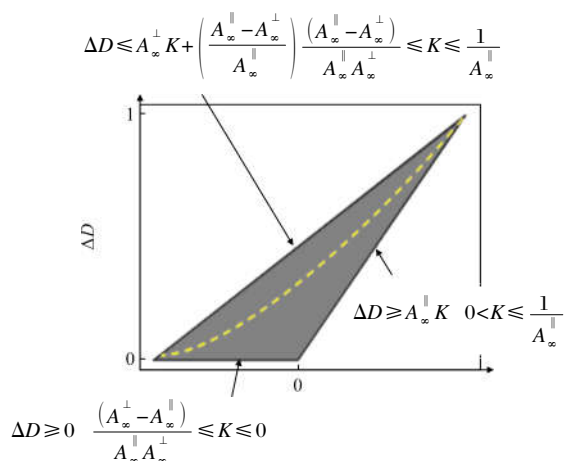


图 9 $\Delta D(x, y)$ 和 $K(x, y)$ 关系图

Fig.9 Relationship between $\Delta D(x, y)$ and $K(x, y)$

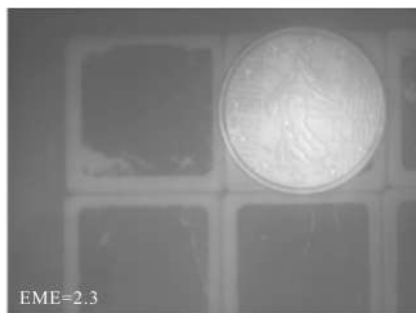


图 10 场景图(图 8(a))复原图

Fig.10 Recovered image of the scene in Fig.8(a)

该方法克服了以往散射环境下偏振成像技术对于高 DOP 物体探测失效的问题,拓展了散射环境中偏振成像技术的适用范围。

3.3 基于透过率校正的偏振图像复原方法

根据水下偏振成像物理模型,水下透过率 $t(x, y)$ 的取值范围在 0~1 之间。但对应高 DOP 的物体区域, $\Delta D(x, y)$ 值的存在会导致水下透过率估计值出现负数。参考文献[37]提出了一种基于透过率校正的偏振图像复原方法用于正确地估计透过率,该方法设置透过率阈值 t_{inf} ,并通过曲线拟合实现拐点平滑化(如图 11 所示),进而得到校正后的透过率函数,然后利用校正后的透过率实现水下偏振图像复原。针对图 8(a)中的场景,复原效果如图 12 所示。

从图 12 可以看出,基于透过率校正的复原图像对比度和清晰度得到了极大的提高,无论对应于低 DOP 物体(塑料魔方)还是高 DOP 物体(金属硬币),图像质量都得到了提升,且复原效果优于参考文献[23]

中的方法(如图 13 所示)。此外,该方法算法简单,可在没有任何先验条件的情况下,应用到任何复杂几何形状物体的复原。

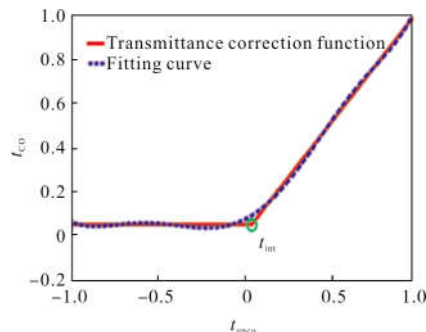


图 11 透过率校正图^[37]

Fig.11 Schematic of transmittance correction

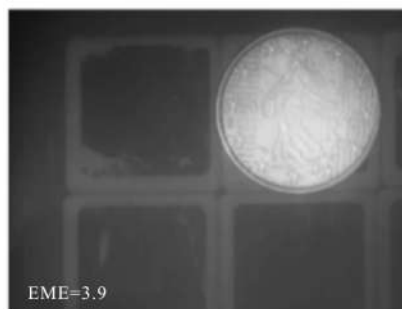


图 12 对场景图 8(a)进行透过率校正后的复原图

Fig.12 Image recovered by transmittance correction for the scene in Fig.8(a)

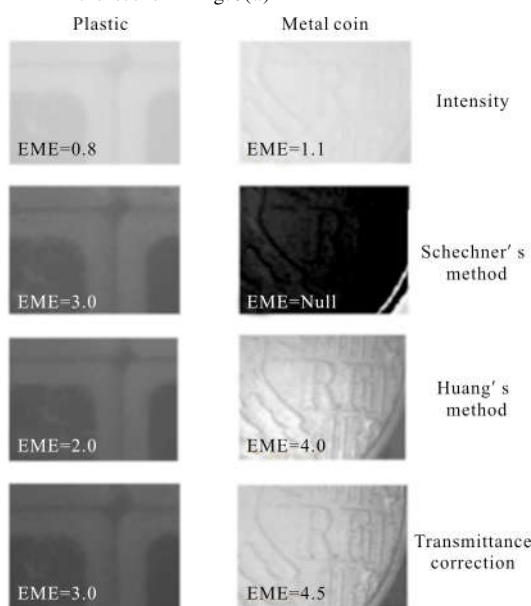
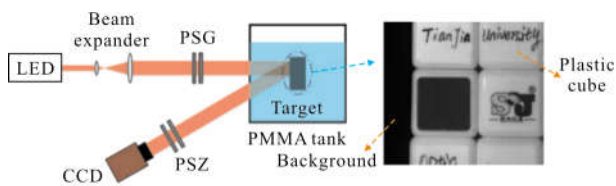


图 13 细节放大光强图及基于不同方法的图像复原细节放大图

Fig.13 Enlarged view of parts of the intensity image and the recovered images by different methods

3.4 基于圆偏振光照明的偏振图像联合复原方法

传统的水下偏振图像复原技术虽然能够有效抑制背向散射光,实现图像清晰度的提升,但在高浓度散射介质环境下效果受限。研究表明圆偏振光在强散射介质中具有更好的保偏能力^[38-40],即圆偏振光不容易丧失其偏振特性^[38]。根据圆偏振光的这一特性,参考文献[41]将圆偏振光作为主动照明光,结合传统的偏振复原模型实现高浓度散射介质环境中的图像复原,可进一步提高偏振图像复原质量。基于水下主动圆偏振光主动照明成像系统如图 14 所示。



(a) 装置图 (b) 清水下光强图
(a) Experimental setup (b) Intensity image in clear water
图 14 水下主动圆偏振光主动照明成像系统

Fig.14 Underwater imaging system based on active circularly polarized illumination

通过调整光源后起偏器(PSG)的偏振状态,实现

圆偏振光主动照明。该系统下 CCD 相机探测到的光可分为两种:一部分是线偏振光,另一部分是圆偏振光:

$$\vec{S} = \vec{S}_{l\text{-polarized}} + \vec{S}_{c\text{-polarized}} + \vec{S}_{\text{unpolarized}} = \begin{bmatrix} \sqrt{s_1^2 + s_2^2} \\ s_1 \\ s_1 \\ 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_3 \\ 0 \\ 0 \\ s_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_1 - \sqrt{s_1^2 + s_2^2} - s_3 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (15)$$

式中: l 和 c 分别表示线性偏光和圆偏光。

通过改变 CCD 相机前的检偏器(PSA)的偏振状态,获取多张不同偏振态下的偏振图像,然后从中测量得到 Stokes 矢量,进而分别计算出其圆偏振信息和线性偏振信息,并基于圆偏振与线偏振联合进行图像复原。具体体现在:首先对光强图像作线偏振光的图像复原,去除具有线偏振特性的背向散射光;然后对线偏复原后的图像进一步作圆偏振的图像复原,去除具有圆偏振特性的背向散射光。该方法的流程如图 15 所示。

该方法通过利用 Stokes 矢量的全分量信息,

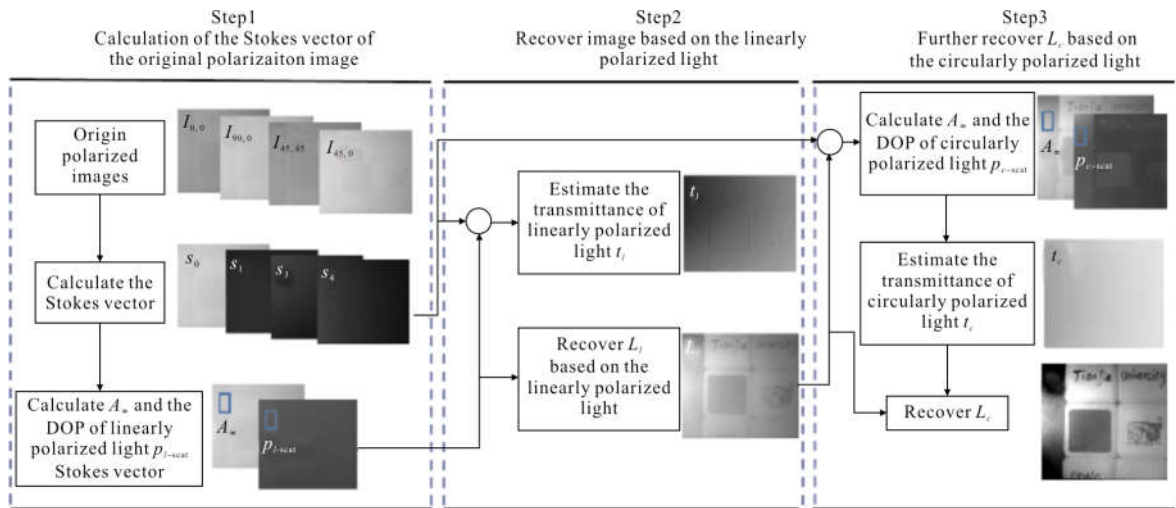


图 15 基于圆偏振光和线偏振光联合偏振图像复原方法流程图^[41]

Fig.15 Flowchart of the polarimetric image recovery method combining circularly polarized light and linearly polarized light

将圆偏振信息和线性偏振信息结合起来,实现分步、联合复原。实验结果表明其复原效果显著优于传统的仅基于线偏振复原的方法,尤其对于高浓度散射环境,图像清晰度得到了显著提升(如图 16 所示)。由图 16 可以看出,在中高浓度浑浊水下,图像

的有效信息被严重衰减,传统的 Schechner 的方法虽然可以一定程度上提高清晰度,但效果有限。基于圆偏振光照明的联合复原方法可显著提升图像清晰度、提高光强图中的字母和图标的对比度,具有明显的优势。

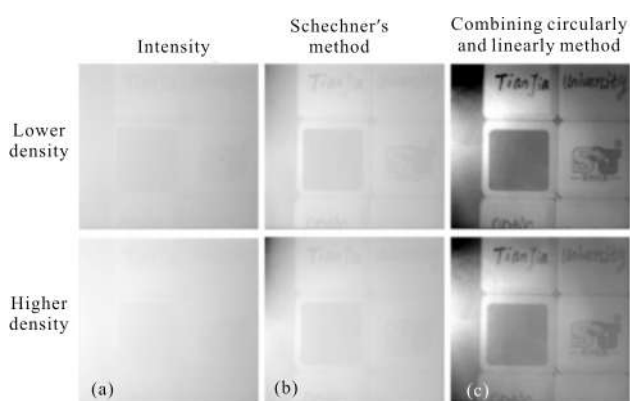


图 16 (a) 不同浓度散射介质下的光强图像;(b) Schechner 的方法复原图像;(c) 基于圆偏振光和线偏振光联合的复原图像
Fig.16 (a) Intensity images of the scene in turbid water with different densities of turbid medium; (b) Recovered images by Schechner's method; (c) Recovered images by the method combining circularly polarized light and linearly polarized light

3.5 基于偏振相关型直方图均衡的水下图像复原方法

偏振复原方法还可以与传统的数字图像处理技术有机结合,有效解决高浓度散射介质下成像复原

问题。通过对所测得的目标偏振信息加以数字化预处理,可显著减小在散射环境中背向散射的干扰,从而进一步提高成像清晰度和系统可视距离,更有利于对水下目标的识别与分析。

参考文献[42]提出了简单有效的结合方法,将直方图均衡和水下偏振复原相结合。首先对某一偏振图像(例如 I^\perp)进行直方图均衡预处理,处理后的图像为:

$$I_{pro}^\perp = \frac{I^\perp - \min(I^\perp)}{\max(I^\perp) - \min(I^\perp)} 2^m \quad (16)$$

预处理后的灰度空间涵盖整个 m 维空间,背向散射光的干扰一定程度上被抑制。对应的 I^\parallel 状态下的光强图可通过偏振度 P_{cor} 关联得到:

$$I_{pro}^\parallel = \frac{1 - P_{cor}}{1 + P_{cor}} I_{pro}^\perp \quad (17)$$

基于预处理后的正交偏振光强图 ($I_{pro}^\parallel, I_{pro}^\perp$),利用传统的偏振复原方法即可得到更清晰的复原图。方法流程如图 17 所示。相比于传统的方法,通过数

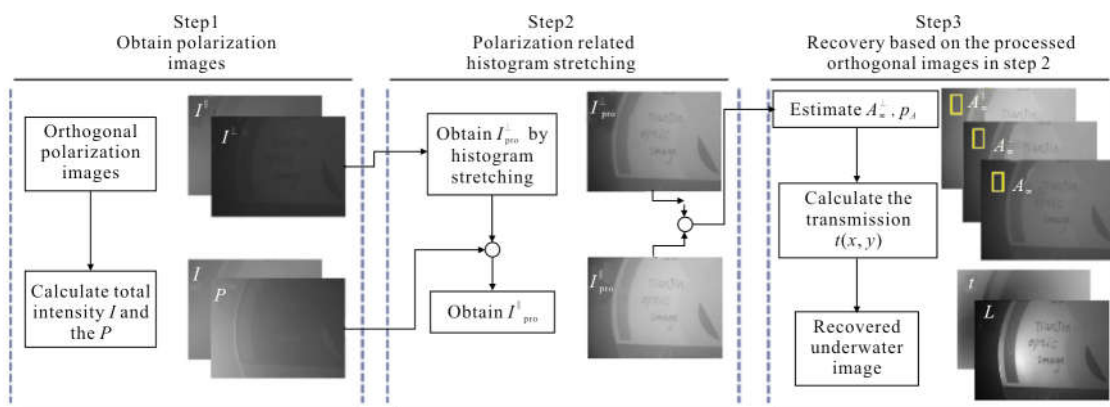
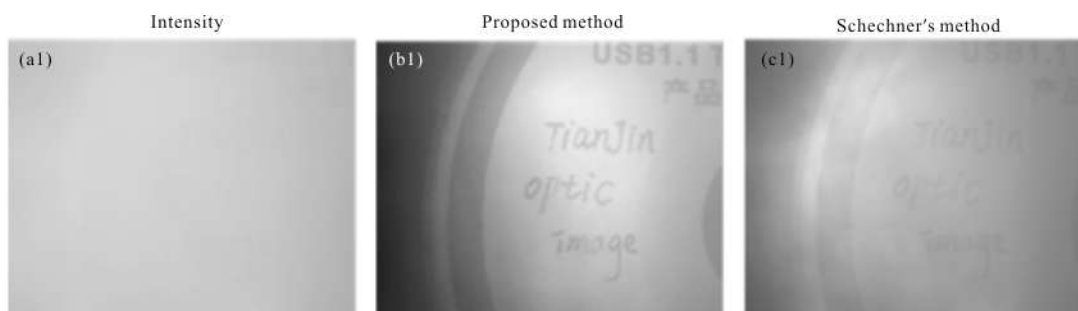


图 17 基于偏振相关型直方图均衡的水下图像复原方法流程图^[42]

Fig.17 Flowchart of the under water image recovery method based on polarization related histogram stretching

字图像处理技术和偏振成像技术结合的图像复原技术可极大提升图像清晰度。特别是对于高浓度散射

介质环境(如图 18 所示),图像细节复原完整,对比参考文献[42]中的方法首次实现了数字图像处理技



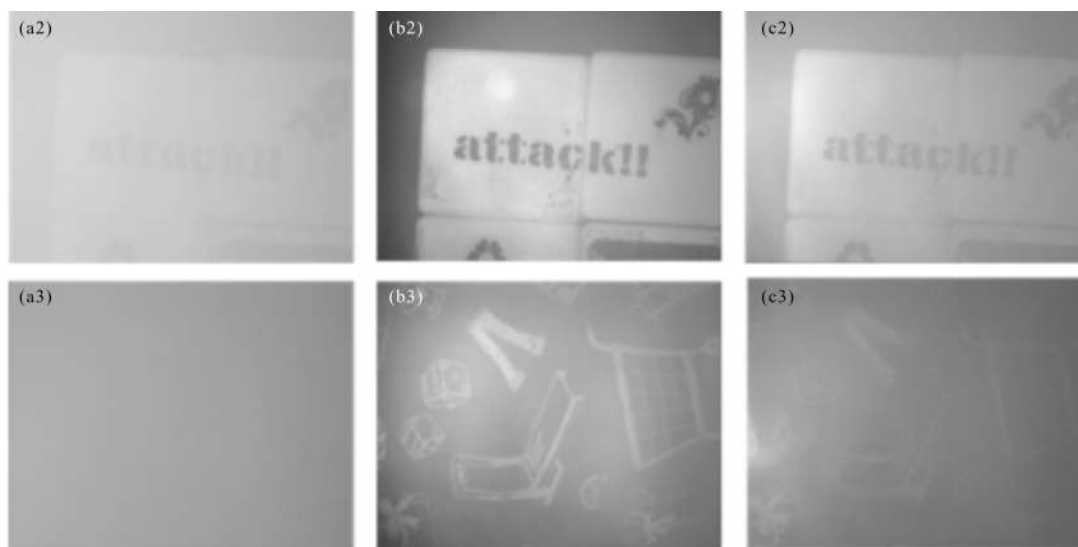


图 18 高浓度水下散射介质复原效果对比图

Fig.18 Comparison of recovered results in dense turbid medium

术与偏振技术的结合,在高浓度散射介质下具有突出的复原效果,拓展了偏振复原技术的适用范围,打开了偏振复原技术的新思路。

3.6 基于图像相关法的水下偏振图像复原方法

光学相关作为一种有效的光学识别技术,在目标复原与识别等领域具有独特优势。其利用光学相关方法(频域相关分析、运算等)实现目标图像与参考图像的相关,计算两者相似程度,并据此判断目标图像中的有效信息^[43-45]。

参考文献[45]利用光学相关技术的特征优势,结合主动水下偏振成像技术的特点,首次将光学相关技术引入到水下偏振复原的方法中。利用光学相关原理计算场景任意一组正交偏振图的相关性,并建立相关性和复原效果之间的关系,原理如图 19 所示。相关峰的形状与目标图像和参考图像间的相似度有关,相似度越高,相关峰形状越细长,相反,相关峰形状越扁平。由于主动水下偏振图像复原中理想的正交偏振子图分别对应场景中的光强最大和最小两种

情况,其对应相似度最低。通过优化相关参数使得相关性最低,正交子图差异性最大,实现探测效果的提升,进而实现高质量水下成像探测,首次实现了基于光学相关的偏振水下目标的识别和复原。

高浓度散射介质环境下,背向散射光和场景光在高浓度浑浊水体中退化过程中存在显著差异,图像相关的方法可以有效表征背向散射光和场景光的信息相关程度,为计算场景光偏振度提供全局性的计算依据。参考文献[46]通过优化传统的光学相关技术,并引入浑浊度的量化模型,实现了高浓度浑浊水下的偏振图像复原(如图 20 所示)。

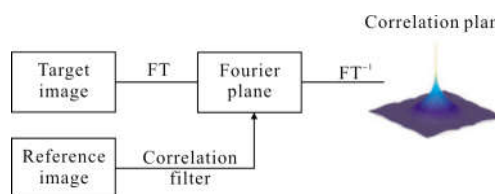
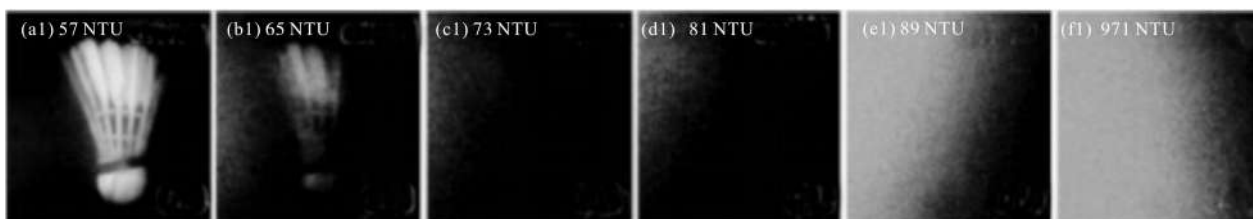


图 19 图像相关法原理^[45]

Fig.19 Principle of the imaging correlation method



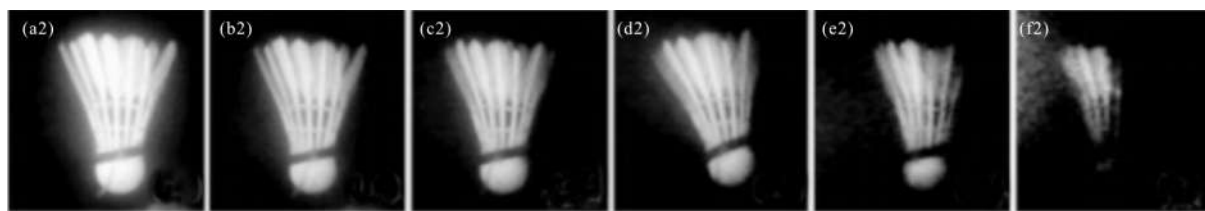


图 20 基于图像相关法的水下偏振复原技术在不同浑浊水体中的光强图和复原图^[46]

Fig.20 Intensity images and recovered images by imaging polarimetry and correlation techniques in water with gradually varied turbidity^[46]

3.7 非均匀光场下的偏振图像复原方法

由于水下成像系统多采用主动照明方式,然而这种情况下光场是非均匀的,导致在场景中微粒散射光的偏振度在全空间上的不均匀分布^[47-49]。参考文献[50]提出一种在散射环境中非均匀光场下的偏振图像复原方法,考虑并利用光场非均匀性造成的背向散射光偏振度在空间分布不均的影响,通过对背景区域背向散射光偏振度和散射强度作三维拟合(如图 21 所示)得到全空间背向散射光偏振度和强度的分布函数,然后通过进一步计算得到复原后的图像(如图 22 所示)。

可以看出,相比于原始光强图,该方法将 EME 值从 0.37 提升到了 6.35,图像的清晰度得到显著提升。并且在不同位置复原图像的质量可以保持较高的水平。该方法有效克服了在水下非均匀照明条件下,背向散射光的偏振度和强度在空间分布不均匀带来的问题。

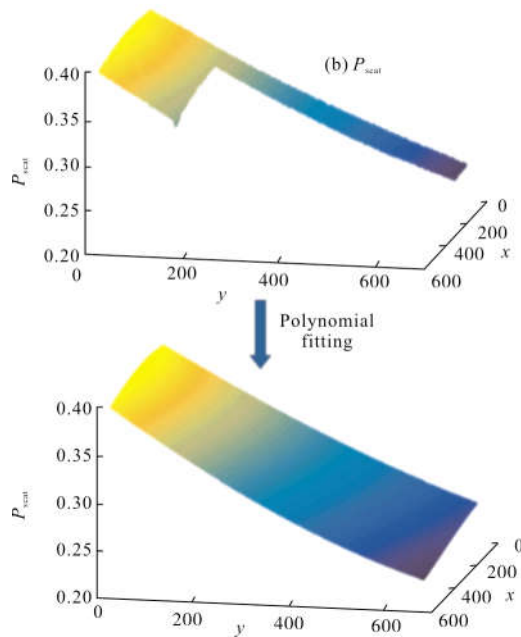
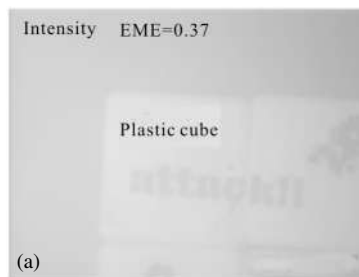
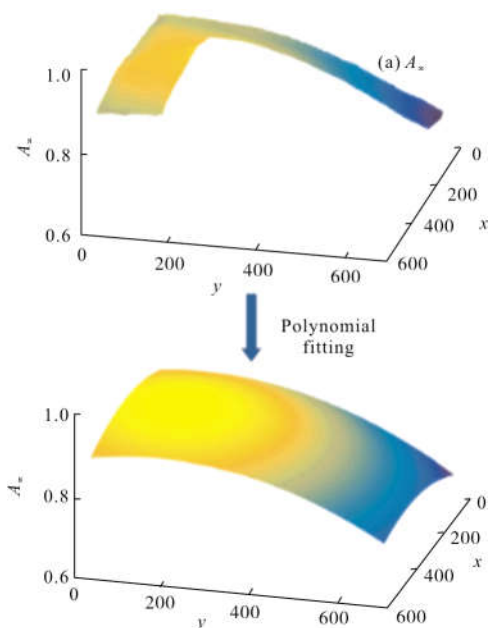


图 21 (a) $A_s(x, y)$ 在成像空间上的分布; (b) $P_{scat}(x, y)$ 在成像空间上的分布

Fig.21 (a) Imaging spatial distribution of $A_s(x, y)$; (b) Imaging spatial distribution of $P_{scat}(x, y)$



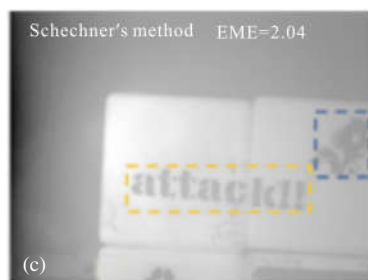


图 22 非均匀光场下复原效果对比图

Fig.22 Comparisons of recovered results under the non-uniform optical field

4 结论

文中主要介绍了基于偏振成像系统的水下图像复原技术的基本原理、实现算法、存在的问题,并重点介绍了具有代表性的最新研究进展。水下散射微粒造成的背向散射光具有明显的部分偏振特性,因而相比于其他复原方法,基于偏振成像的水下图像复原技术从原理上可有效抑制背向散射光,分离物体光和散射光,实现成像清晰度的提升。且在高浓度散射介质环境下,通过主动偏振光照明,偏振复原技术能更大程度地抑制背向散射光,提升图像质量和系统可见度。此外,因其算法简单快速、细节信息复原度高等特点被广泛应用于各种水下应用领域。

为了更全面地介绍基于偏振成像的水下图像复原技术的最新研究进展,文中将该技术分为基于偏振差分的复原技术和基于物理退化模型的偏振图像复原技术。

偏振差分复原技术通过正交偏振图之间的共模抑制作用实现背景散射光的抑制。对于简单的水下目标识别有较好的效果,但对于低偏振度物体和复杂场景等,复原效果一般。基于物理退化模型的偏振水下复原技术根据主动光在散射介质环境中的部分偏振光特性,分离物体反射光和背向散射光,通过估计透过率和散射光强、反演退化模型实现场景复原。该类技术作为现有的主流偏振复原技术经过长期的发展和改进,理论和实验上均趋于成熟,适用于各类散射介质环境且复原效果明显。

在今后的发展中,特高浓度散射介质环境下的图像复原,特别是包含高低偏振度物体的复杂水下场景图像复原仍然是一个亟待解决和改进的关键问

题^[51-52]。此外,如何更合理、有效、智能地将数字图像处理技术(例如计算机视觉、神经网络、深度学习等)和基于偏振成像系统的物理方法相结合应用于水下图像复原,在高浓度散射环境下克服光学器件的限制,实现基于偏振成像系统的高质量、实时快速的动态图像复原仍是一个重要的发展方向。

参考文献:

- [1] Komatsu S, Markman A, Javidi B. Optical sensing and detection in turbid water using multidimensional integral imaging[J]. *Optics Letters*, 2018, 43(14): 3261-3264.
- [2] Ji T, Wang G. An approach to underwater image enhancement based on image structural decomposition [J]. *Journal of Ocean University of China*, 2015, 14(2): 255-260.
- [3] Hua Dengxin, Wang Jun. Research progress of ocean laser remote sensing technology [J]. *Infrared & Laser Engineering*, 2018, 47(9): 0903003. (in Chinese)
华灯鑫, 王骏. 海洋激光遥感技术研究进展 [J]. 红外与激光工程, 2018, 47(9): 0903003.
- [4] Huang Youwei, Jin Weiqi, Ding Kun, et al. Underwater forward scattering imaging model based on beam broadening [J]. *Infrared & Laser Engineering*. 2009, 38(4): 669-701. (in Chinese)
黄有为, 金伟其, 丁琨, 等. 基于光束空间展宽的水下前向散射成像模型[J]. 红外与激光工程, 2009, 38(4): 669-701.
- [5] Nie Ying, He Zhiyi. Underwater imaging and real-time optical image processing under illumination by light sources with different wavelengths [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(7): 0710002. (in Chinese)
聂瑛, 何志毅. 不同波长光源照明的水下成像及光学图像实时处理[J]. 光学学报, 2014, 34(7): 0710002.
- [6] Jaffe J S. Computer modeling and the design of optimal underwater imaging systems [J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 1990, 15(2): 101-111.
- [7] Jaffe J S, Moore K D, McLean J, et al. Underwater optical imaging: status and prospects [J]. *Oceanography*, 2001, 14(3): 66-76.
- [8] Singh H, Adams J, Mindell D, et al. Imaging underwater for archaeology [J]. *Journal of Field Archaeology*, 2000, 27(3): 319-328.
- [9] Xu Y, Wen J, Fei L, et al. Review of video and image defogging algorithms and related studies on image restoration and enhancement[J]. *IEEE Access*, 2016, 4: 165-188.

- [10] Li X, Hu H, Zhao L, et al. Polarimetric image recovery method combining histogram stretching for underwater imaging[J]. *Scientific reports*, 2018, 8(1): 12430.
- [11] Yang Fan, Wang Chunyan, Pang Guangning, et al. Optical system design for underwater polarization detector [J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2018, 41(1): 56–59. (in Chinese)
杨帆, 王春艳, 庞广宁, 等. 基于偏振技术的水下探测器光学系统设计[J]. 长春理工大学学报, 2018, 41(1): 56–59.
- [12] Emberton S, Chittka L, Cavallaro A. Underwater image and video dehazing with pure haze region segmentation [J]. *Computer Vision and Image Understanding*, 2018, 168: 145–156.
- [13] Serikawa S, Lu H. Underwater image dehazing using joint trilateral filter [J]. *Computers & Electrical Engineering*, 2014, 40(1): 41–50.
- [14] Han Pingli, Liu Fei, Zhang Guang, et al. Multi-scale analysis method of underwater polarization imaging [J]. *Acta Physica Sinica*, 2018, 67(5): 054202. (in Chinese)
韩平丽, 刘飞, 张广, 等. 多尺度水下偏振成像方法[J]. 物理学报, 2018, 67(5): 054202.
- [15] Jayasree M S, Thavaseelan G, Scholar P G. Underwater color image enhancement using wavelength compensation and dehazing[J]. *International Journal of Computer Science and Engineering Communications*, 2014, 2(3): 389–393.
- [16] He K, Sun J, Tang X. Single image haze removal using dark channel prior [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2011, 33(12): 2341–2353.
- [17] Sathya R, Bharathi M, Dhivyasri G. Underwater image enhancement by dark channel prior [C]//IEEE International Conference on Electronics and Communication Systems (ICECS), 2015: 1119–1123.
- [18] Lu H, Li Y, Nakashima S, et al. Underwater image super-resolution by descattering and fusion[J]. *IEEE Access*, 2017, 5: 670–679.
- [19] Zhang W, Liang J, Ren L, et al. Real-time image haze removal using an aperture-division polarimetric camera [J]. *Applied Optics*, 2017, 56(4): 942–947.
- [20] Liang J, Zhang W, Ren L, et al. Polarimetric dehazing method for visibility improvement based on visible and infrared image fusion [J]. *Applied Optics*, 2016, 55(29): 8221–8226.
- [21] Schechner Y Y, Karpel N. Recovery of underwater visibility and structure by polarization analysis[J]. *Journal of Oceanic Engineering*, 2005, 30(3): 570–587.
- [22] Liang Jian, Ren Liyong, Ju Haijuan, et al. Polarimetric dehazing method for dense haze removal based on distribution analysis of angle of polarization [J]. *Optics Express*, 2015, 23(20): 26146–26157.
- [23] Huang B J, Liu T G, Hu H F, et al. Underwater image recovery considering polarization effects of objects[J]. *Optics Express*, 2016, 24(9): 49826–49838.
- [24] Han Jiefei, Xiao Min, Sun Liying, et al. Influence of underwater targets with different polarization properties on the resolution of imaging system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(3): 0311001. (in Chinese)
韩捷飞, 夏珉, 孙立颖, 等. 水下目标不同偏振特性对成像系统分辨率的影响[J]. 光学学报, 2016, 36(3): 0311001.
- [25] Liang Jian, Ju Haijuan, Zhang Wenfei, et al. Review of optical polarimetric dehazing technique [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(4): 0400001. (in Chinese)
梁健, 巨海娟, 张文飞, 等. 偏振光学成像去雾技术综述[J]. 光学学报, 2017, 37(4): 0400001.
- [26] Cariou J, Jeune B L, Lotrian J, et al. Polarization effects of seawater and underwater targets[J]. *Applied Optics*, 1990, 29(11): 1689–1695.
- [27] Schechner Y Y, Karpel N. Clear underwater vision [C]//Proceedings of the 2004 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2004.
- [28] Mudge J, Virgen M. Real time polarimetric dehazing [J]. *Applied Optics*, 2013, 52(9): 1932–1938.
- [29] Gao Jun, Bi Ran, Zhao Lujian, et al. Global optimized hazed image reconstruction based on polarization information [J]. *Optics & Precision Engineering*, 2017, 25(8): 2212–2220. (in Chinese)
高隽, 毕冉, 赵录建, 等. 利用偏振信息的雾天图像全局最优重构[J]. 光学精密工程, 2017, 25(8): 2212–2220.
- [30] Zhang W, Liang J, Ju H, et al. A robust haze-removal scheme in polarimetric dehazing imaging based on automatic identification of sky region [J]. *Optics & Laser Technology*, 2016, 86: 145–151.
- [31] Qu Y, Zou Z. Non-sky polarization-based dehazing algorithm for non-specular objects using polarization difference and global scene feature[J]. *Optics Express*, 2017, 25(21): 25004–25022.
- [32] Guan Jinge, Zhu Jingping, Tian Heng, et al. Real-time polarization difference underwater imaging based on Stokes

- vector[J]. *Acta Physica Sinica*, 2015, 64(22): 224203. (in Chinese)
管今哥, 朱京平, 田恒, 等. 基于 Stokes 矢量的实时偏振差分水下成像研究[J]. 物理学报, 2015, 64(22): 224203.
- [33] Tian Heng, Zhu Jingping, Zhang Yunyao, et al. Image contrast for different imaging methods in turbid media [J]. *Acta Physica Sinica*, 2016, 65(8): 084201. (in Chinese)
田恒, 朱京平, 张云尧, 等. 浑浊介质中图像对比度与成像方式的关系[J]. 物理学报, 2016, 65(8): 084201.
- [34] Tyo J S, Rowe M P, Pugh Jr E N, et al. Target detection in optically scattering media by polarization-difference imaging [J]. *Applied Optics*, 1996, 35(11): 1855-1870.
- [35] Zhang Jiamin, Shi Dongfeng, Huang Jian, et al. Full Stokes polarization correlated imaging [J]. *Infrared & Laser Engineering*, 2018, 47(6): 0624001. (in Chinese)
张家民, 时东锋, 黄见, 等. 全 Stokes 偏振关联成像技术研究[J]. 红外与激光工程, 2018, 47(6): 0624001.
- [36] Wang Haifeng. Development and applications of small airborne polarization imaging system [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2017, 44(11): 1075-1082. (in Chinese)
王海峰. 小型机载偏振成像系统研制及应用研究[J]. 光电工程, 2017, 44(11): 1075-1082.
- [37] Hu H, Zhao L, Huang B, et al. Enhancing visibility of polarimetric underwater image by transmittance correction[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2017, 9(3): 1-10.
- [38] Laan J D V D, Scrymgeour D A, Kemme S A, et al. Increasing detection range and minimizing polarization mixing with circularly polarized light through scattering environments [C]//SPIE Sensing Technology Applications, 2014, 9099: 909908.
- [39] Ni X H, Alfano R R. Time-resolved backscattering of circularly and linearly polarized light in a turbid medium[J]. *Optics Letters*, 2004, 29(23): 2773-2775.
- [40] Van der Laan J D, Scrymgeour D A, Kemme S A, et al. Detection range enhancement using circularly polarized light in scattering environments for infrared wavelengths [J]. *Applied Optics*, 2015, 54(9): 2266-2274.
- [41] Hu H, Zhao L, Li X, et al. Polarimetric image recovery in turbid media employing circularly polarized light [J]. *Optics Express*, 2018, 26(19): 25047-25059.
- [42] Li X, Hu H, Zhao L, et al. Polarimetric image recovery method combining histogram stretching for underwater imaging[J]. *Scientific Reports*, 2018, 8(1): 12430.
- [43] Leonard I, Alfalou A, Brosseau C. Spectral optimized asymmetric segmented phase-only correlation filter [J]. *Applied Optics*, 2012, 51(14): 2638-2650.
- [44] Miller P C, Caprari R S. Demonstration of improved automatic target-recognition performance by moment analysis of correlation peaks [J]. *Applied Optics*, 1999, 38(8): 1325-1331.
- [45] 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.
- [46] Liu F, Han P, Wei Y, et al. Deeply seeing through highly turbid water by active polarization imaging [J]. *Optics Letters*, 2018, 43(20): 4903-4906.
- [47] Garcia R, Nicosevici T, Cufí X. On the way to solve lighting problems in underwater imaging [C]//OCEANS'02 MTS/IEEE, 2002, 2: 1018-1024.
- [48] Padmavathi G, Subashini P, Kumar M M, et al. Comparison of filters used for underwater image pre-processing [J]. *International Journal of Computer Science and Network Security*, 2010, 10(1): 58-65.
- [49] Prabhakar C J, Kumar P U. An image-based technique for enhancement of underwater images[J]. *arXiv*, 2012, 1212: 0291.
- [50] Hu H, Zhao L, Li X, et al. Underwater image recovery under the non-uniform optical field based on polarimetric imaging[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2018, 10(1): 1-9.
- [51] Kocak D M, Dalgleish F R, Caimi F M, et al. A focus on recent developments and trends in underwater imaging [J]. *Marine Technology Society Journal*, 2008, 42(1): 52-67.
- [52] Bonin F, Burguera A, Oliver G. Imaging systems for advanced underwater vehicles [J]. *Journal of Maritime Research*, 2011, 8(1): 65.