

基于非偏振光照明的水下偏振成像目标增强技术

杨力铭¹, 梁健², 张文飞², 巨海娟², 任立勇^{2*}, 韩军¹, 屈恩世²

¹西安工业大学光电工程学院, 陕西 西安 710021;

²中国科学院西安光学精密机械研究所信息光子学研究室, 陕西 西安 710119

摘要 分析水中粒子对光的吸收及后向散射造成的图像退化的物理模型, 提出一种基于非偏振光照明的水下偏振成像目标增强技术。该技术的优势在于非偏振光照明确保了目标反射光与杂散光始终存在偏振态差异; 采用偏振角特征参量确保了杂散光光强估算的精确性。与基于线偏振光照明的水下偏振成像技术相比, 其适用范围更广, 图像恢复精度更高。实验结果表明, 该方法能够提高水下图像的能见度与对比度, 对比度至少提升 100%, 适用于不同材质目标、不同成像距离以及不同杂质、不同浑浊程度的水体环境, 在水下成像领域具有潜在应用价值。

关键词 图像处理; 偏振成像; 图像增强; 散射介质成像

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.0611003

Underwater Polarimetric Imaging Target Enhancement Technology Based on Unpolarized Illumination

Yang Liming¹, Liang Jian², Zhang Wenfei², Ju Haijuan²,
Ren Liyong², Han Jun¹, Qu Enshi²

¹School of Photoelectronics Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an, Shaanxi 710021, China;

²Research Department of Information Photonics, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Xi'an, Shaanxi 710119, China

Abstract The underwater polarimetric imaging target enhancement technique based on unpolarized illumination is proposed based on the physical model of image degradation caused by light absorption and backscattering by particles in water. The advantage of this technology is that the unpolarized light ensures that there is always a difference in polarization between the target reflected light and stray light. And, the characteristic parameters of angle of polarization is used to ensures the accuracy of estimation of stray light intensity. Compared with the current underwater polarimetric imaging techniques based on polarized illumination, the proposed method has wide application range and high image recovery accuracy. Experimental results show that the proposed method can effectively improve the visibility and contrast of underwater images, and the contrast is increased by at least 100%. It is suitable for water bodies with different material targets, different imaging distances, and different impurities and turbidity levels. It has potential application in the underwater imaging field.

Key words image processing; polarimetric imaging; image enhancement; imaging through turbid media

OCIS codes 100.2980; 110.5405; 110.0113

1 引 言

水下光学成像在海洋资源探测、海底管道检测以及水下考古等领域具有重要的应用价值^[1-3]。通

常在水体环境中, 光学成像系统的能见度和获取图像的对比度非常低, 因此, 难以对图像信息进行有效处理和分析。一方面, 水体对光的吸收和散射作用使得包含目标信息的光线不能理想成像, 导致水下

收稿日期: 2017-12-01; 收到修改稿日期: 2018-01-23

基金项目: 国家自然科学基金(61505246, 61535015)

作者简介: 杨力铭(1989—), 男, 硕士研究生, 主要从事偏振光学成像技术方面的研究。E-mail: yjl890215@sina.com

导师简介: 韩军(1966—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事先进成像探测技术与光电信息处理方面的研究。

E-mail: hanjun513@126.com

* 通信联系人。E-mail: renliy@opt.ac.cn

目标成像模糊;另一方面,杂散光形成的噪声会与目标反射光叠加,致使图像对比度降低^[4]。

水体对光的散射过程非常复杂,如何克服水体散射对光学成像的影响是一项富有挑战的工作。为此,学者们进行了大量的研究来分离目标反射光与杂散光,如时间门成像技术^[5-6]和 高频滤波技术^[7]等能够在一定程度上提高图像对比度。然而,这些技术实现过程复杂,处理过程耗时长,实时性较差。另外,这些方法普遍不考虑图像退化的物理本质,只提高图像细节的对比度,在图像处理中导致目标细节信息丢失和噪声增强。

偏振光学成像技术是一种新型的光学成像技术^[8],偏振图像可以反映在强度图像中难以观察到的许多独特信息。偏振光学去散射成像技术是其重要的应用方向之一,适用于雾霾大气环境^[9]和浑浊水下环境中的清晰成像。相比于大气环境,水下环境的衰减系数更高且环境照明光更弱,通常采用主动照明的成像方式,现行的水下偏振成像技术主要有:1) 基于仿生物视觉的偏振差分成像(PDI)技术^[10-13],文献[11]通过控制扭转向列型液晶(TNLC)开关,获得了偏振方向正交的两幅图像及其偏振差分图像,该方法有效提高了水下图像的对比度,但是当散射作用较强时,差分图像的细节仍难以分辨,此时需要进行仿射变换凸显目标细节信息;偏振差分技术^[12]需要选取最优检偏角实现对杂散光的抑制,耗时长限制了实时探测能力和对运动目标的探测能力;文献[13]考虑了目标反射光的偏振态,得到了较好的实验结果,目标的细节信息得到凸显,但在处理过程中需要手动选取无目标的背景区域。2) 基于圆偏振记忆效应的圆偏振成像技术^[14-15],该方法采用圆偏振光主动照明,只接收反射光的圆偏振信号,能够有效抑制背景噪声,达到清晰成像的目的,其需要在目标反射光到达探测器的时刻进行采集,通常与距离选通^[16]系统相结合。上述方法均可提高图像的对比度,但是为了满足复杂水体环境下快速清晰成像,需要一种更简便且实时性强的去散射算法。

通常,前向散射造成图像模糊,后向散射造成图像对比度降低,而引起水下图像质量退化的主要原因是后向散射^[17]。为了克服后向散射光对图像质量的影响,本文对水下成像的物理模型^[18]进行研究,提出一种基于非偏振光照明水下偏振成像目标增强技术。利用偏振角(AoP)代替偏振度(DoP)特征参量估算杂散光光强,可以抑制目标

反射光的影响,提高估算的精确度;无需手动选取不包含目标的背景区域,实时性更高;另外,采用非偏振光主动照明的优势在于:现行水下偏振成像系统大多采用线偏振光主动照明的成像方式,当目标材质不同、水体环境不同时,可能致使目标反射光与杂散光的偏振态相近。而采用非偏振光主动照明,根据米氏散射理论,在散射角为 0° 时,目标反射光为非偏振光,杂散光为部分偏振光,利用二者偏振态的差异,可以从目标反射光中有效分离杂散光,提高水下图像的复原质量,同时该实验装置简便,适用范围更广。当介质散射系数较大时,部分目标反射光会经历前向散射使得到达探测器的目标反射光部分变为偏振光,但是实际测量中,起主导作用的是杂散光及其偏振态,而非目标反射光及其偏振态。因此仍可以近似认为目标反射光为非偏振光。采用不同材质的目标,在不同浓度、不同成像距离的水体环境中进行实验验证,结果表明,该方法可提升图像能见度与对比度,具有普适性与稳健性。

2 基本原理

2.1 水下成像物理模型

与大气去雾成像模型类似,在水体环境中,到达探测器的光强主要包括两部分:一部分是经衰减后的目标反射光,也称直接透射光,包含了场景目标的强度信息;另一部分是由水中颗粒散射导致的后向散射光,也称杂散光,是水下图像降质的主要因素。

水下图像退化物理模型如图1所示^[19],场景目标反射光 I_L 在传播过程中,会受到水中粒子的强散射和吸收作用,到达探测器的直接透射光光强 I_D 随传输距离指数衰减:

$$I_D = I_L \cdot t(z), \quad (1)$$

式中 $t(z)$ 为透射率,定义为 $t(z) = \exp[-\beta(x, y)z]$, z 为目标与探测器间的距离, $\beta(x, y)$ 为衰减系数,假设衰减系数为空间常量,则透射率可表示为

$$t(z) = \exp(-\beta \cdot z). \quad (2)$$

杂散光是由水中粒子直接散射照明光造成的,其到达探测器时的光强 I_A 可表示为

$$I_A = I_{A\infty}[1 - t(z)], \quad (3)$$

式中 $I_{A\infty}$ 为无穷远处杂散光光强,表示无目标处的杂散光光强,到达探测器时的总光强 I 是直接透射光光强和杂散光光强的非相干叠加,可表示为

$$I = I_D + I_A. \quad (4)$$

结合(1)、(3)、(4)式,消去透射率,得到目标反

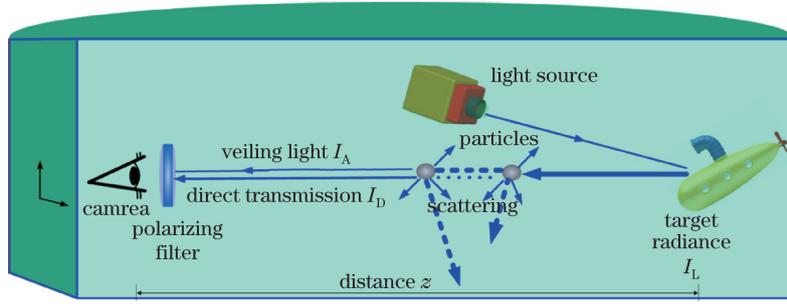


图 1 水下成像物理退化模型

Fig. 1 Physical degradation model of underwater imaging

射光强为

$$I_L = \frac{I - I_A}{1 - I_A/I_{A\infty}}, \quad (5)$$

式中 I_A 和 $I_{A\infty}$ 为反演 I_L 的两个关键参数, 对其精确估算与否直接决定复原后图像的质量。

2.2 基于 Stokes 矢量的水下偏振去散射技术

基于 Stokes 矢量的偏振成像技术与偏振差分成像技术的不同点在于: 后者只能通过差分图像得到偏振度信息, 而前者可以同时获得偏振度和偏振角信息, 而偏振角信息对 I_A 和 $I_{A\infty}$ 的精确估算非常重要。具体步骤如下。

首先, 拍摄偏振方向分别为 0° 、 45° 、 90° 和 135° 的 4 幅图像, 其强度分别记作 $I(0)$ 、 $I(45)$ 、 $I(90)$ 和 $I(135)$, 则场景的线 Stokes 矢量可分别表示为^[20]

$$\begin{cases} S_0 = I(0) + I(90) \\ S_1 = I(0) - I(90) \\ S_2 = I(45) - I(135) \end{cases}, \quad (6)$$

式中 S_0 为场景的总光强, 即 I , S_1 为水平方向和垂直方向的强度差, S_2 为 45° 和 135° 方向的强度差。根据(6)式可以得到偏振度 p 和偏振角 θ 的表达式, 分别为

$$p = \sqrt{S_1^2 + S_2^2}/S_0, \quad (7)$$

$$\theta = \arctan(S_2/S_1)/2. \quad (8)$$

从(7)式和(8)式可以看出, 偏振度与 S_0 有关, 而偏振角与 S_0 无关。在水体环境中, 直接透射光的偏振信息很微弱, 即使部分区域的直接透射光具有一定的偏振信息, 也属于局部信息, 从全局变量的角度出发, 直接透射光主要存在于 S_0 中, 对 S_1 和 S_2 影响较小。因此, 相比于现行算法中利用偏振度估算杂散光光强, 本文利用偏振角对杂散光光强进行估算可以最大程度地抑制对直接透射光的影响, 提高估算的精确度。根据(8)式计算图像中每一像素点的偏振角值, 选取出现频率最高的偏振角作为杂散光偏振角 θ_A 。而杂散光偏振度则认为该像素群

所计算出的偏振度最大值, 即:

$$p_A = \max[p(\theta_A)]. \quad (9)$$

其次, 定义 0° 和 90° 拍摄角度方向分别为 x 、 y 轴, 根据光强和电场强度的关系, 可以得到杂散光偏振部分光强 A_p 在 x 、 y 轴的分量表达式, 分别为

$$\begin{cases} A_{px} = A_p \cdot \cos^2 \theta_A \\ A_{py} = A_p \cdot \sin^2 \theta_A \end{cases}. \quad (10)$$

同时, 在 x 和 y 方向采集的图像强度分别为 $I(0)$ 和 $I(90)$, 可以分别得到 A_{px} 和 A_{py} 的表达式为总光强减去非偏振部分光强的 $1/2$, 即:

$$\begin{cases} A_{px} = I(0) - S_0(1 - p)/2 \\ A_{py} = I(90) - S_0(1 - p)/2 \end{cases}. \quad (11)$$

结合(10)式和(11)式, 可以得到杂散光偏振部分光强为

$$A_p = [I(0) - S_0(1 - p)/2]/\cos^2 \theta_A = [I(90) - S_0(1 - p)/2]/\sin^2 \theta_A, \quad (12)$$

根据(9)式和(12)式, 即可得到各像素点的杂散光光强 $A = A_p/p_A$ 。

再次估算无穷远处杂散光光强。将(2)~(3)式代入(1)式, 可得:

$$I = I_{A\infty} + (I_L - I_{A\infty}) \cdot \exp(-\beta \cdot z), \quad (13)$$

可见, 当距离 z 趋于无穷远或 $I_L = I_{A\infty}$ 时, (13)式变为 $I = I_{A\infty}$ 。将 $I(0)$ 的杂散光改写为偏振部分与非偏振部分之和, 同时根据前述假设条件——直接透射光为非偏振光, 可得:

$$I(0) = I_{A\infty} p_A \cos^2 \theta_A + \frac{1 - p_A}{2} I_{A\infty} + \left[\frac{I_L}{2} - (I_{A\infty} p_A \cos^2 \theta_A + \frac{1 - p_A}{2} I_{A\infty}) \right] \cdot \exp(-\beta z). \quad (14)$$

假设图像中所有像素点均满足 z 趋于无穷, 则(14)式右端第二项趋于 0, 因此可以得到无穷远处杂散光光强为

$$A_\infty(z \rightarrow \infty) = 2I(0)/[1 + p_A \cos(2\theta_A)]. \quad (15)$$

应当注意,实际图像中绝大多数像素点并不满足 z 趋于无穷的假设条件,因此,(15)式计算得到的无穷远处杂散光光强用 $A_\infty = (z \rightarrow \infty)$ 表示,以此区分最终得到的无穷远处杂散光光强。对于水下图像,只有当 $I = A_\infty$ 时上述假设成立,因此比较(15)式得到的无穷远处杂散光光强与原图像强度 I ,最接近的像素点认为是假设成立的像素点,该点对应的 $A_\infty(z \rightarrow \infty)$ 即为无穷远处杂散光光强 I_{A_∞} 。

最后,根据(5)式可求得复原后的图像 I_L ,本文算法可以精确估算杂散光光强 I_A 和无穷远处杂散光光强 I_{A_∞} ,无需人机交互,更适用于水下实时成像。

3 实验结果与分析

在真实的水体环境中进行实验验证。图 2(a) 为实验装置示意图,照明光源为中心波长为 510 nm 的非偏振 LED 灯,相机镜头前放置一线偏振片作为检偏器。LED 灯出射的照明光经目标反射后通过线偏振片,由相机接收。实验中,在玻璃缸 (300 mm × 300 mm × 300 mm) 中灌满清水,在水中掺杂不同杂质改变水体的浑浊程度。实验目标为粘贴在塑料板上的五角钱金属硬币,如图 2(b) 所示,将其悬挂在水中。

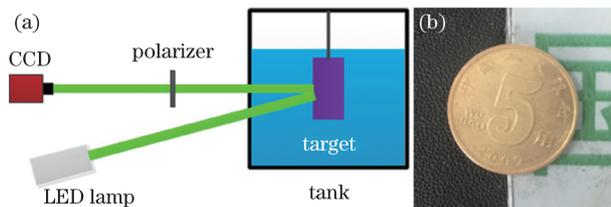


图 2 实验设置示意图。(a) 实验装置示意图; (b) 实验目标
Fig. 2 Experimental setup. (a) Schematic of experimental setup for underwater imaging; (b) the target of experiment

首先,在 28.9 cm × 28.9 cm × 19.5 cm (体积约 16.3 L) 的清水中加入 2.27 g 氧化镁 (MgO) 粉末改变水体的浑浊程度。旋转线偏振片,拍摄偏振方向分别为 0°、45°、90° 和 135° 的 4 幅图像,如图 3 所示。在该环境中图像的对比度很低,几乎难以分辨目标的细节信息。

随后,对原始偏振图像进行处理,得到去散射后的图像,如图 4 所示。可以看出,处理后图像的对比度提高,图像质量大幅改善。相比于图 3,硬币的细节信息更明显,特别是硬币上的“5”字更容易辨别,同时在原始图像中难以辨别的其他细节信息也得到了增强,轮廓更明显。充分表明该算法可以有效去除杂散光对图像质量的影响。

上述实验中加入了较多的 MgO 粉末,水体浑

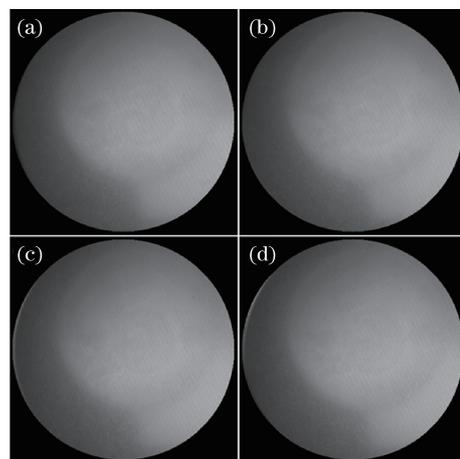


图 3 不同偏振方向下的偏振图像。
(a) 0°; (b) 45°; (c) 90°; (d) 135°

Fig. 3 Polarized images taken with different angle of polarizer. (a) 0°; (b) 45°; (c) 90°; (d) 135°

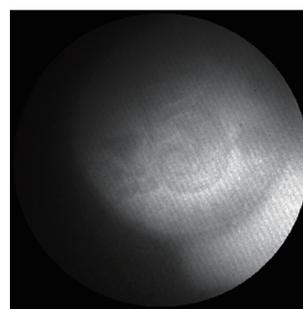


图 4 处理后的图像

Fig. 4 Recovered image

浊度较高,为了证明该算法对不同水体条件下图像复原的普适性,随后在相同体积的清水中加入 1.755 g 的 MgO 粉末进行实验。与上述实验相比,水体浑浊程度降低,但目标放置在距探测器更远的位置。通过图 3 可知,不同偏振方向所对应的 4 幅图像的强度很接近,因此在下面的实验中,只选用其中的一幅图像,以 $I(0)$ 为例,与处理后的结果进行对比。第二组实验原始图像及处理后图像如图 5 所示。可以看出,硬币在原始强度图像中难以分辨,而在处理后图像中,硬币变得清晰可辨;同时,粘贴硬币所用塑料板上的字母“O”(白色矩形标注区域)也隐约可见。

为了体现处理后图像对比度的提升,利用灰度直方图对图像进行评价。图 6(a) 和 6(b) 分别对应图 5(a) 和 5(b) 的灰度直方图分布。从图中可见,原始图像灰度直方图分布主要集中在较窄的灰度级范围,整幅图像的细节信息被淹没;而去散射效果图的灰度直方图分布更宽广,意味着图像的灰度信息被拉伸,整幅图像的对比度得到提升。

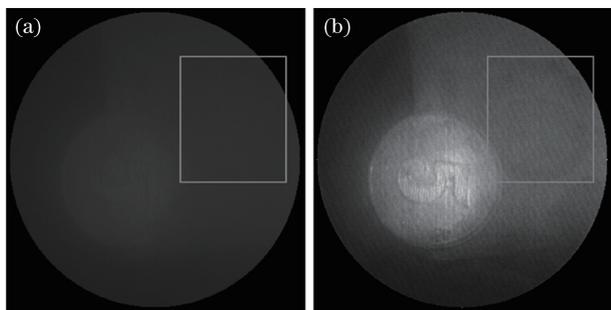


图 5 原始图像及处理后图像对比。
(a) 0°方向原始图像; (b)处理后图像

Fig. 5 Comparison of original and processed images.

(a) Original image of 0°; (b) recovered image

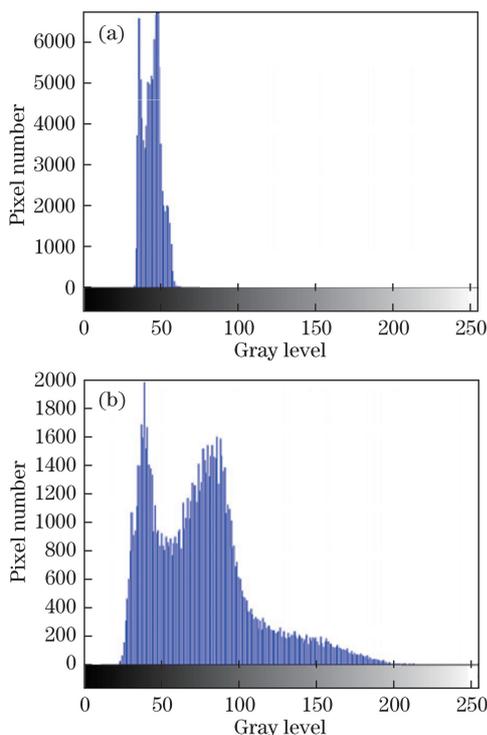


图 6 图 5 的直方图结果。(a)图 5(a); (b)图 5(b)

Fig. 6 Histograms of Fig. 5. (a) Fig. 5(a); (b) Fig. 5(b)

除了在水中掺杂 MgO 粉末改变水体的浑浊程度外,还可以加入牛奶进行实验,在相同体积的清水中加入 11.761 g(约 12 mL)的牛奶。同样地,给出原始图像与处理后图像的对比,结果如图 7 所示。可以看出,处理后图像对比度更高,图像的质量也明显优于原始图像。与此同时,塑料板上的“国”字也更清晰。实验结果表明,该算法适用于不同材质的目标,不论偏振度高低(分别对应于金属和较粗糙的塑料表面)。

在图像像质提升定量化分析方面,虽然简单的评价函数不能全面评价去散射图像质量,但是可以客观说明去散射引起的图像质量变化。本文采用对

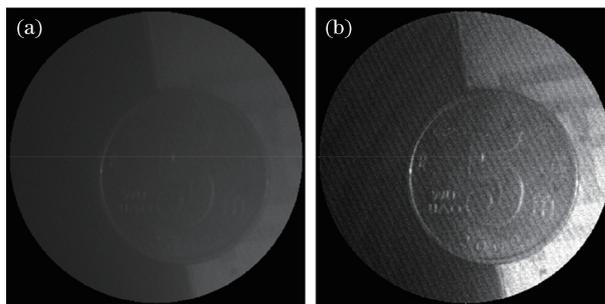


图 7 原始图像及处理后图像对比。
(a) 0°方向原始图像; (b)处理后图像

Fig. 7 Comparison of original and processed images.

(a) Original image of 0°; (b) recovered image

比度函数对图像质量进行评价,其表达式为^[21]

$$C(I) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{x,y} [I(x,y) - \bar{I}]^2 / \bar{I}}, \quad (16)$$

式中 N 为图像中的总像素数, \bar{I} 为图像的强度平均值, $I(x,y)$ 为像素点 (x,y) 对应的强度值。根据(16)式可以计算上述实验中图像的对比度,进而计算出每组图像的提升百分率,结果如表 1 所示,其中 C 表示对比度。可以看出,处理后图像的对比度较原始图像均得到了提升,提升的百分率相对较高。

在此,定义上述 3 组实验依次为实验 1~3,从表 1 结果可以看出,一方面,实验 2 中图像对比度提升高于实验 1,其原因分析如下:对于表 1 中第一列,实验 2 中原始图像对比度低于实验 1,这表明实验 2 中直接透射光的散射作用更强,直接透射光的退偏振更严重,直接透射光经过强退偏后偏振态与部分偏振的杂散光偏振态差别更大,因此可以根据偏振态的差异更精确地估算杂散光光强 I_A 。上述实验结果说明,本文算法更适用于散射效应较高的水体环境。另一方面,实验 1 与实验 3 在图像对比度百分率提升方面相当,说明本文算法处理对比度相近的原始图像具有很好的稳定性与一致性。

表 1 不同实验的图像质量

Table 1 Image quality in different experiments

Experiment	C (original)	C (recovered)	Improvement /%
Experiment 1	0.2969	0.7979	168.7
Experiment 2	0.1284	0.4451	246.7
Experiment 3	0.2479	0.7082	185.7

4 结 论

提出了一种基于非偏振照明的水下偏振成像目标增强技术。利用非偏振光进行主动照明,从部分偏振态的杂散光中有效分离出非偏振态的直接透

射光,进而利用偏振角对杂散光光强进行精确估算。

本文实验方案简单方便,有利于该方法与现有成像系统相结合;真实水体环境中的实验证明了该方法的有效性,处理后水下图像的能见度和对比度均得到了大幅提高,对比度提升了100%以上;同时,处理后图像的细节信息也得到了大幅增强,该方法适用于不同材质的目标,不同的成像距离,以及不同浓度的水体环境。另外,本文方法无需人机交互,可与微偏振片阵列成像技术^[22]相结合,在水下实时去散射方面具有潜在应用价值。

参 考 文 献

- [1] Ortiz A, Simo M, Oliver G. A vision system for an underwater cable tracker[J]. *Machine Vision and Applications*, 2002, 13(3): 129-140.
- [2] Coleman D F, Newman J B, Ballard R D. Design and implementation of advanced underwater imaging system for deep sea marine archaeological surveys[C]//IEEE Conference and Exhibition of OCEANS, 2000, 1(1): 661-665.
- [3] Bailey G N, Flemming N C. Archaeology of the continental shelf: Marine resources, submerged landscapes and underwater archaeology[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2008, 27(23/24): 2153-2165.
- [4] Jaffe J S. Computer modeling and the design of optimal underwater imaging system[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 1990, 15(2): 101-111.
- [5] Swartz B A, Cummings J D. Laser range-gated underwater imaging including polarization discrimination[J]. *Proceeding of SPIE*, 1991, 37(15): 42-56.
- [6] Tan C, Seet G, Sluzek A, *et al.* Scattering noise estimation of range-gated imaging system in turbid condition[J]. *Optics Express*, 2010, 18(20): 21147-21154.
- [7] Mullen L, Laux A, Cochenour B. Propagation of modulated light in water: implications for imaging and communications systems[J]. *Applied Optics*, 2009, 48(14): 2607-2612.
- [8] Liang J, Ju H J, Zhang W F, *et al.* Review of optical polarimetric dehazing technique[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(4): 0400001.
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.
- [9] Liang J, Ren L Y, Ju H J, *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.
- [10] Han J F, Xia M, Sun L Y, *et al.* Influence of underwater targets with different polarization properties on the resolution of imaging system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(3): 0311001.
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.
- [11] Rowe M P, Pugh E N, Tyo J S, *et al.* Polarization-difference imaging: a biologically inspired technique for observation through scattering media[J]. *Optics Letters*, 1995, 20(6): 608-610.
- [12] Tyo J S, Rowe M P, Pugh E N, *et al.* Target detection in optically scattering media by polarization-difference imaging[J]. *Applied Optics*, 1996, 35(11): 1855-1870.
- [13] 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): 9826-9838.
- [14] Nothdurft R, Yao G. Applying the polarization memory effect in polarization-gated subsurface imaging[J]. *Optics Express*, 2006, 14(11): 4656-4661.
- [15] Kim A D, Moscoso M. Backscattering of circularly polarized pulses[J]. *Optics Letters*, 2002, 27(18): 1589-1591.
- [16] Wang B, Wan L, Li Y, *et al.* Underwater laser image segmentation method based on adaptive pulse coupled neural networks[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(4): 0410004.
王博, 万磊, 李晔, 等. 基于自适应脉冲耦合神经网络的水下激光图像分割方法[J]. *光学学报*, 2015, 35(4): 0410004.
- [17] Treibitz T, Schechner Y Y. Instant 3D escatter[C]//IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2006, 2: 1861-1868.
- [18] Treibitz T, Schechner Y Y. Active polarization descattering[J]. *IEEE Transactions of Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2009, 31(3): 385-399.
- [19] 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.
- [20] Goldstein D H. *Polarized light*[M]. Boca Raton: Taylor and Francis, 2010.
- [21] Schechner Y Y, Narasimhan S G, Nayar S K. Polarization-based vision through haze[J]. *Applied Optics*, 2003, 42(3): 511-525.
- [22] Peng Y, Feng B, Shi Z L, *et al.* Non-uniformity correction in polarization imaging obtained with integrated microgrid polarimeters[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(4): 0404004.
彭勇, 冯斌, 史泽林, 等. 微偏振片阵列成像的非均匀性校正研究[J]. *红外与激光工程*, 2017, 46(4): 0404004.