

## 水下光学图像处理研究进展

郭银景\*<sup>①③</sup> 吴琪<sup>①</sup> 苑娇娇<sup>①</sup> 侯佳辰<sup>①</sup> 吕文红<sup>②③</sup>

<sup>①</sup>(山东科技大学电子信息工程学院 青岛 266590)

<sup>②</sup>(山东科技大学交通学院 青岛 266590)

<sup>③</sup>(青岛智海牧洋有限公司 青岛 266590)

**摘要:** 水下光学图像处理是水下设备完成深海探测和作业任务的重要依据。在简述了水下光学图像处理的研究背景、意义及其研究热点的基础上, 该文从水下图像光照因素改善与颜色校正两个方面, 详细综述了水下成像技术和水下图像清晰化算法的研究进展, 重点论述了基于成像模型的图像复原方法和图像增强方法两个最为活跃的研究方向的研究现状。根据水下光学图像处理研究热点, 分别从考虑光的前向折射, 水下成像模型和图像增强算法结合, 引入相关领域新型算法和提高图像处理实时性的角度, 展望了水下光学图像处理研究的发展趋势。

**关键词:** 图像处理; 水下成像; 图像清晰化算法; 图像复原; 图像增强

中图分类号: TN911.73; TP391

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2021)02-0426-10

DOI: [10.11999/JEIT190803](https://doi.org/10.11999/JEIT190803)

## Research Progress on Underwater Optical Image Processing

GUO Yinjing<sup>①③</sup> WU Qi<sup>①</sup> YUAN Jiaojiao<sup>①</sup> HOU Jiachen<sup>①</sup> LÜ Wenhong<sup>②③</sup>

<sup>①</sup>(College of Electronic Information Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China)

<sup>②</sup>(College of Transportation, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China)

<sup>③</sup>(Qingdao Intelligent Ocean Technology Co, Qingdao 266590, China)

**Abstract:** Underwater optical image processing is an important basis for underwater equipment to complete deep-sea exploration and operation tasks. Based on a brief description of the research background, significance and hotspots of underwater optical image processing, this paper gives a detailed overview of underwater imaging technology and clearness of underwater images from the aspects of improving the lighting factors and color correction of underwater images. The research progress focuses on the research status of the two most active research directions of image restoration methods and image enhancement methods based on imaging models. According to the research hotspots of underwater optical image processing, the research of underwater optical image processing is prospected from the perspectives of considering the forward refraction of light, combining underwater imaging models and image enhancement algorithms, introducing new algorithms in related fields, and improving the real-time performance of image processing.

**Key words:** Image processing; Underwater imaging; Image sharpening algorithm; Image restoration; Image enhancement

### 1 引言

水下光学图像在海洋能源勘探、海洋生态保护

以及海洋军事等领域有着极为广泛的应用, 是水下机器人完成深海探测和作业任务的重要依据<sup>[1]</sup>。水下光学图像成像畸变小、粒度细且图像信息丰富, 在无人潜航器深海作业中发挥着重要作用。与陆地成像不同, 水下介质分布不均匀, 成像条件复杂。**图1**为水下光学成像原理图<sup>[2]</sup>, 影响水下光成像的因素很多, 如: 光的散射效应会造成水下图像模糊; 波长吸收会导致捕获图像中的颜色失真; 人工照明设备以及摄像系统的浮动使得水下光照环境呈非均匀状态, 图像中心部位形成亮斑而周围形成暗

收稿日期: 2019-10-16; 改回日期: 2020-02-28; 网络出版: 2020-12-11

\*通信作者: 郭银景 gyjlwh@163.com

基金项目: 国家自然科学基金(61471224), 山东省重点研发计划(公益类专项)项目(2018GHY115022)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61471224), Shandong Province Key Research and Development Program (Special Project for Public Welfare) (2018GHY115022)

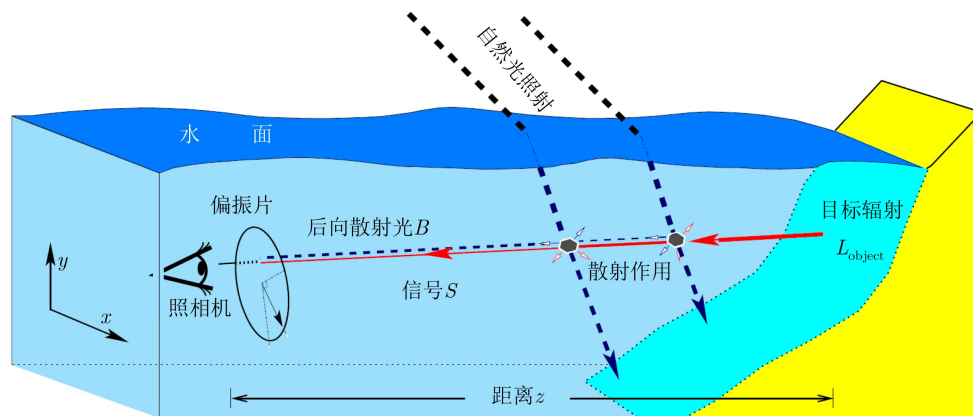


图1 水下光学成像原理图

区，严重影响图像对比度<sup>[1,3]</sup>。光子在水中传输经历了衰减和散射，导致水下视频图像存在特征模糊、兴趣区域结构细节少等问题<sup>[4]</sup>。

基于水下成像的具体特征，提高水下成像质量和改善光照因素造成的影响与颜色失真水下光学图像处理的研究热点。本文将从水下成像和光学图像处理的角度，综述针对成像技术和改善图像中存在的光散射、光照不均匀、颜色失真问题的研究进展。

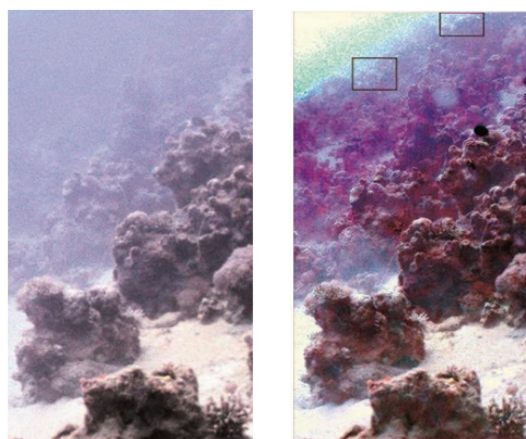
## 2 水下图像处理研究进展

### 2.1 水下成像技术

20世纪60年代，海洋光学的研究已经给出水下光传播的各项性质，水下光学成像系统开始初步应用于海洋生态等领域<sup>[5]</sup>。根据海洋光学成像的应用领域及技术特点，目前应用的水下成像方式有激光成像、偏振成像、立体成像和荧光成像。

常用的水下激光成像包括激光距离选通法和同步扫描法。目前典型的水下距离选通成像系统是加拿大DRDC Valcartier(国防研究所)的LUCIE系列产品，装载在ROV(Remote Operated Vehicle)上可工作在距海平面200 m的水下，对港口和深海进行探测与监测，该产品至今已发展了3代<sup>[6-8]</sup>。南洋理工大学研制了一款距离选通成像系统，文献<sup>[9,10]</sup>利用该系统进行选通图像的自适应融合，获得所有成像路径上的目标图像，增大了距离选通系统的影深。在激光成像系统中，摄像机与光源相邻，目标位于混浊介质的后面，该系统通过选择目标反射光并关闭闪光灯来阻挡后向散射。2001年，美国Lockheed Martin公司<sup>[11]</sup>研制的一款激光扫描成像仪，在8 m成像距离下的分辨率为3 mm。2010年Scripps海洋研究所研制的水下激光扫描成像仪，其采样频率可以达到160 line/s<sup>[12]</sup>。国内，北京理工大学、中国科学院半导体研究所、中国海洋大学也进行了水下激光成像的相关研究。

偏振成像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。1990年，Cariou等人<sup>[13]</sup>对水下人工目标进行偏振成像，发现偏振成像效果与人工目标的表面粗糙度、材料电磁属性、入射光方向及水中粒子有关，并提出可以利用偏振成像对不同材料的水下目标进行识别。2000年，曹念文等人<sup>[14]</sup>开展了偏振成像技术对提高成像清晰度、成像距离的实验，通过定量计算成像图像的清晰度，得出了偏振图像清晰度与距离的定量关系，发现在水质较清时，圆偏振成像效果比线偏振成像效果好，随着水体衰减系数变大，线偏振成像效果好于圆偏振的重要结论。2003年，美国马里兰大学<sup>[15]</sup>利用偏振光观察到了墨鱼的其他图像特征，扩展了偏振光成像的应用领域。2009年，以色列理工大学<sup>[16]</sup>研制的水下偏振成像仪采用圆偏振光代替线偏振光，获得了更好的成像质量。2007年，文献<sup>[17]</sup>提出了先进的偏振成像技术水下方法(图2)，偏光镜在白平衡的效果下拍摄的原始图片(图2(a))可抵消水下环境因照明引起



(a) 原始图像

(b) 恢复的图像

图2 文献<sup>[17]</sup>提出的水下成像方法

的强烈蓝色色调；恢复后的图像(图2(b))比单纯的白平衡成像效果更优，远处物体的成像质量提高，目标边缘轮廓清晰度改善，显著提高图像可见性。

为检测珊瑚礁中微生物，文献[18]提出一种荧光方法恢复水下场景的形状。文献[19]还提出一种不同方向的照明融合模糊图像混浊度的方法，能够很好地去掉人工光的亮点。2013年，Hardy等人<sup>[20]</sup>乘载“深海挑战者”号成功下潜至马里亚纳海沟底部，利用潜水器上搭载的3D成像相机系统，成功拍摄到了深海3D影片，并制作了90 min的“深海挑战”3D记录片。2014年，Roser等人<sup>[21]</sup>(图3)提出一种水下恢复的立体成像方法，通过估计可见度系数得到图像，利用实时算法设计立体成像方法并应用于水下机器人，立体成像方法下得到的原始图像经恢复后，图像清晰，可见度高，同时实时算法确保AUV水下作业的高效进行。



(a) 原始图像

(b) 处理结果

图3 文献[21]提出的水下立体成像方法效果图

## 2.2 水下图像清晰化算法

针对光的散射和光照不均匀因素对水下图像产生的影响以及图像颜色失真问题，研究人员提出并不断改进清晰化算法以改善图像质量。现有的水下图像清晰化方法可分为基于成像模型的图像复原方法和图像增强方法。基于成像模型的图像复原方法针对水下图像退化过程，构建适用于水下环境的成像模型以恢复清晰图像。图像增强方法主要通过改变水下图像每个颜色通道的强度值以改善图像的亮度与颜色，从而改善图像质量。

### 2.2.1 基于光照问题改善的清晰化算法

去除光散射是水下图像处理的研究重点。Garcia等人<sup>[22]</sup>针对水下图像的散射极化问题，运用光照模型、局部直方图均衡化、同态滤波等方法进行图像增强处理，局限性在于假定高频图像数据与低频阴影分量分离。Schechner等人<sup>[2]</sup>采用偏振滤波器估计介质散射光，基于后向散射光的特征，把水下图像偏振与需要去除的后向散射联系起来，提出了一种可改善能见度，同时可粗略估计3维场景的结构的方法，实现散射介质中的能见度增强和距离估计。这种方法需要特定的硬件设备，且需要多幅图片才

能得到能见度增强的水下图像。2018年，Jiang等人<sup>[23]</sup>提出一种新的低复杂度水下图像去散射方法，该方法利用稀疏低秩矩阵将水下图像中的散射分量分离出来，增强图像整体对比度，不需要专门的硬件设备和对水下环境的先验知识。Pan等人<sup>[24]</sup>针对水下散射问题提出增强图像可见度的方法，通过对进化神经网络(evolutionary neural network)采用end to end训练来估计传输图，通过缩减人工预处理和后续处理，尽可能使模型从原始输入到最终输出；借助自适应双边滤波器对传输图进行细化处理，同时基于白平衡的颜色偏差消除策略，以改善散射图像的对比度，增强图像的边缘；Lu等人<sup>[25]</sup>利用深度卷积神经网络解决图像的散射问题，对真实水下图像提出基于光学摄像机和深度卷积神经网络的水下图像深度估计方法，这是首次利用深度学习技术解决水下光学图像深度估计问题，与传统方法相比，该方法能够取得更准确的深度信息。

文献[18]在水下成像模型的基础上提出水下图像综合预处理的框架，采用对比度均衡系统来抑制由光束模式引起的后向散射、衰减和光照不均匀问题，其中后向散射光成分的估计利用高斯函数卷积法，并提出反卷积处理前向散射的想法。2017年，Li等人<sup>[26]</sup>提出分层传输融合方法和用于单输入图像去散射的彩色线环境光估计方法，以暗通道为先验信息来估计初始透过率和环境光，使用颜色线来估计选定面片中的精致环境光，考虑了水下成像中的散射和模糊效应，实现对深度图和环境光的准确估计，提出图像复原框架。同年，文献[27]提出的基于光学成像模型的水下图像超分辨率重构方法，使用暗通道先验和双边滤波优化估算观测数据中的散射光，并作为噪声成分去除，通过提高低分辨率图像质量优化重构图像质量。2018年，文献[28]提出一种融合暗通道先验方法与稀疏表示的图像复原方法，该方法优势在于不直接将稀疏表示模型应用于原始输入图像，而是用于暗通道图，这样不仅能够有效去除噪声，还能减轻局部块选取对复原结果的影响，实验结果(图4)表明，采用这种方式得到的复原结果有效去除了噪声和模糊，同时消除halo效应和块效应。如表1所示，文献[28]方法DoAG值较大，从而去模糊效果更显著；DoH的值较大，因此文献[28]方法图像对景物细节分辨能力较强。2019年，Pan等人<sup>[29]</sup>提出一个多尺度迭代的水下图像去散射框架，利用卷积神经网络对传输映射进行估计，然后采用自适应双边滤波器对估计结果进行优化。文献[29]实验结果(图5)所示，Pan等人提出基于融合框架和边缘保持平滑算子(自适应双边滤

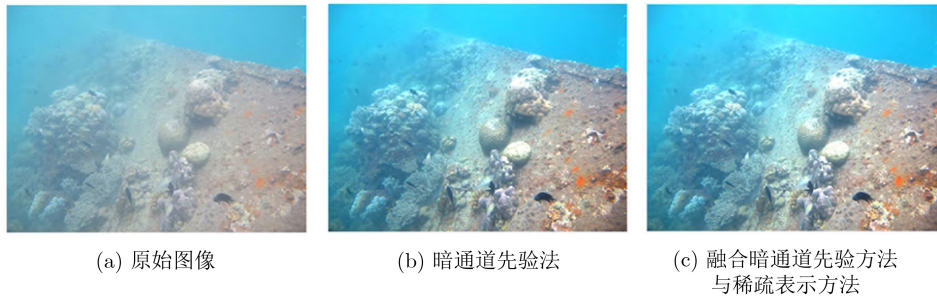


图4 文献[28]中方法实验效果对比图

表1 文献[28]指标对比

文献[28] 指标	AG (平均梯度)	DoAG (平均梯度差值)	H (信息熵)	DoH (信息熵差值)
图4(a)	3.2504	-	6.1859	-
图4(b)	5.8932	2.6428	6.9939	0.7257
图4(c)	6.1823	2.9319	6.9939	0.8080

波)的方法显著提高实际散射图像的可见度,保持了水下图像的自然外观,并恢复了水下图像的信息(如纹理、颜色),在定性和定量上都明显优于文献[30]提出的基于图像消霾方法。

近年来,研究人员就光照不均匀问题不断改进图像处理技术。2005年,文献[31]提出的AINDANE (Adaptive and Integrated Neighborhood Dependent Approach for Nonlinear Enhancement)方法可以处理对比度低和存在光照不均匀的数字图像,利用自适应的光照增强来解决光照不均问题,利用自适应实现图像对比度增强。2006年,Padmavathi等人[32]利用同态滤波、各向异性扩散滤波、小波滤

波等方法来提高图像的对比度,抑制噪声和保留图像的边缘,从而增强和平滑图像。2009年,文献[33]提出基于改进等功率谱法的水下图像增强,根据水下图像成像的规律和图像的特性,结合小波的优点对等功率谱同态滤波法进行相应的改进,通过改变对比度调节因子来处理模糊和光照不均匀问题,并处理了同时存在模糊和光照不均匀时只能取一个对比调节因子的情况。2010年,文献[34]提出一种基于照度分割的局部多尺度Retinex图像增强算法,首先通过引入带参数的对数图像处理(Logarithmic Image Processing, LIP)模型将图像分解成4个照度区域,然后对各区域根据照度的差异采用相应尺度的Retinex算法进行增强,最后通过基于面积的比例因子对各增强后的子图进行照度融合,实现图像增强。

2011年,李庆忠等人[35]提出基于小波变换的水下降质图像复原算法,利用小波变换估计介质散射光,依据原始图像对比度对水下图像进行自适应复原解决图像的模糊问题,然后对复原之后的图像再进行小波变换,在低频子带上进行非线性的亮度调

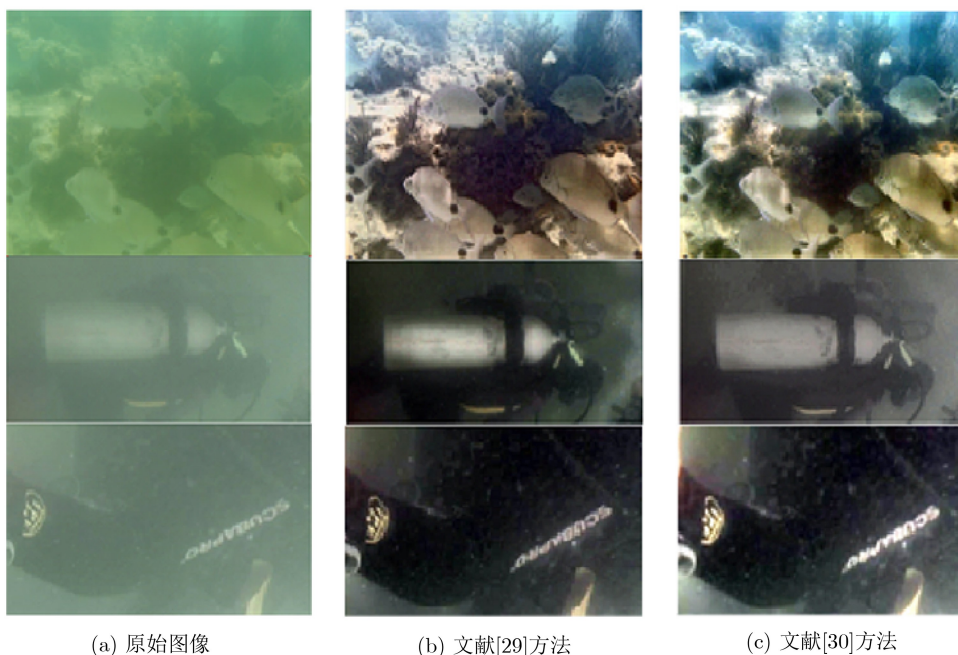


图5 文献[29]与文献[30]实验结果对比

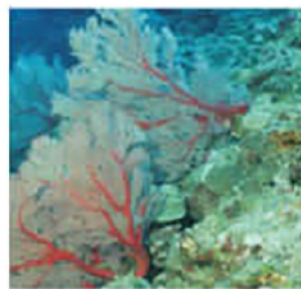
节, 解决光照不均问题。2012年, 郭相凤等人<sup>[36]</sup>针对利用快速算法同时处理光照不均问题, 在小波域的低频子带上结合水下图像光学成像模型, 先利用高斯模糊对介质散射光进行估计与去除, 再采用基于局部复杂度的方法调整衰减因子, 对衰减低频子图进行自适应增强; 在高频子带上采用非线性变换的增强方法, 进一步增强高频信息并有效地抑制噪声的放大。实验结果与文献<sup>[35]</sup>相比(图6), 图像对比度提高、细节信息和边缘信息丰富、清晰度得到改善。

### 2.2.2 基于颜色校正的清晰化算法

在水下图像成像过程中, 由于水体对光线的选择性吸收和光的散射作用, 水下图像经常出现对比度低、颜色失真问题。针对水下图像的颜色失真问题, 研究人员从图像增强方法和基于物理模型的图像复原方法两个角度进行图像清晰化处理, 方法对比如表2所示。

目前, 以颜色恒常理论为基础的水下图像增强算法就颜色校正问题取得了较为理想的处理效果。颜色恒常理论<sup>[37]</sup>基础是目标物体的颜色由其自身对

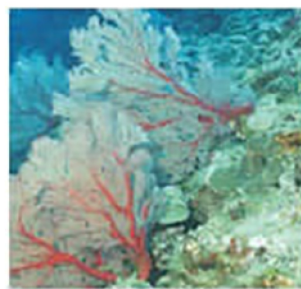
不同波长的反射能力决定, 同时物体的颜色具有一致性即不受非均匀光照的影响。文献<sup>[38]</sup>提出一种基于集成颜色模型的水下图像增强算法, 使用RGB对比度拉伸算法来补偿图像的颜色对比度, 有效改善图像的颜色失真问题。2017年, 文献<sup>[39]</sup>结合白平衡算法, 提出基于前景模型的水下图像增强方法, 利用光在水中的衰减特性, 根据各通道衰减系数之间的关系修正通道增益, 从而补偿因衰减所导致的颜色失真; 利用通道增益调整无雾图像, 最终获得增强后的水下图像。2016年, Li等人<sup>[40]</sup>提出基于物理光谱特征的联合制导图像颜色校正方法, 在高浊度环境下该方法实现水下图像增强, 细化深度图并保留了颜色。文献<sup>[41]</sup>提出一种基于波长补偿和去雾的复原算法(Wavelength Compensation and Image Dehazing, WCID), 提高图像的整体亮度, 对增强类似雾化的图像具有很好的效果。2018年, 文献<sup>[42]</sup>提出基于改进暗通道优先(IDCP)的图像增强算法, 采取自适应比例因子选择策略对透射图进



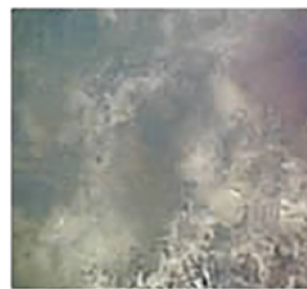
(a)  $C=7.91$ 文献<sup>[36]</sup>中的原图像



(b)  $C=0.86$ 文献<sup>[36]</sup>的原图像



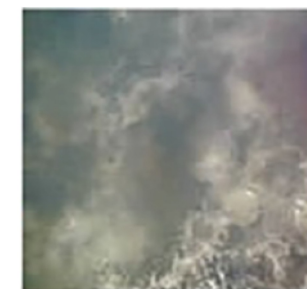
(c)  $C=10.63$ 文献<sup>[35]</sup>结果



(d)  $C=3.97$ 文献<sup>[35]</sup>结果



(e)  $C=16.76$ 文献<sup>[36]</sup>结果



(f)  $C=4.02$ 文献<sup>[36]</sup>结果

图6 文献<sup>[35]</sup>与文献<sup>[36]</sup>实验结果对比

表 2 基于颜色校正的清晰化算法表

清晰化算法	算法切入角度	颜色校正处理		实验效果	文献
图像增强方法	颜色恒常理论	传统方法	图像颜色补偿	提高图像对比度细节深化	[38-42]
			基于Retinex算法	改善模糊、亮度问题	[43-45]
	新思路		基于深度学习框架	颜色自然、色偏修正	[46]
			以视网膜为灵感		[47]
图像复原方法	蓝绿基调考量	平衡蓝绿颜色通道分量		图像远景颜色复原效果更优	[48-50]
	红通道信息考量	传统方法	颜色信息通道估计	精确估计透射率以及背景光信息，优化颜色补偿	[51-54]
		模型重建改进	新思路		神经网络方法及其深度改进

行后处理以得到具有更高对比度的图像恢复效果，进一步采用颜色校正方法去除残余色偏。实验表明，对于色偏不明显但是水中悬浮物较多的浅水区域的图像，采用IDCP算法比DCP算法图像的得到的对比度更优。

依据颜色恒常理论，基于Retinex算法及其后续发展算法的水下图像增强算法在处理颜色失真的水下图像时取得较好的效果。2014年，文献[43]提出基于Retinex算法的水下图像增强方法，对单色校正后的水下图像进行反射率和光照分解，解决了模糊和曝光不足的问题；采用交替方向优化算法进行分解，对分解后的退化图像进行简单有效的后处理。实验结果表明，增强后的图像具有色彩校正、亮度自然等特点。2019年，文献[44]提出基于多尺度Retinex的水下图像增强方法，对图像进行预校正，使像素分布均匀降低主色调；将经典的带强度通道的多尺度Retinex应用于预校正图像，以进一步提高对比度和颜色。实验效果，该算法具有灵活性、适应性、实时性的特点，促进水下机器人的感知水平。2017年，文献[45]结合Jaffe McGlamery成像模型和基于Retinex理论的图像增强算法，提出水下图像清晰化方案，大幅提升图像的对比度和清晰度。文献[45]与WCID算法、基于Retinex理论方法进行对比。各算法相关指标对比如表3所示，对比效果如图7所示。

基于传统算法的研究，水下图像增强处理在算法侧重点以及模型建立角度引入创新观点，进一步改进原始图像中因颜色失真存在色偏等问题。2019年，Liu等人[46]提出一种基于深度学习框架的水下图像增强方法，与其他基于深度学习的水下增

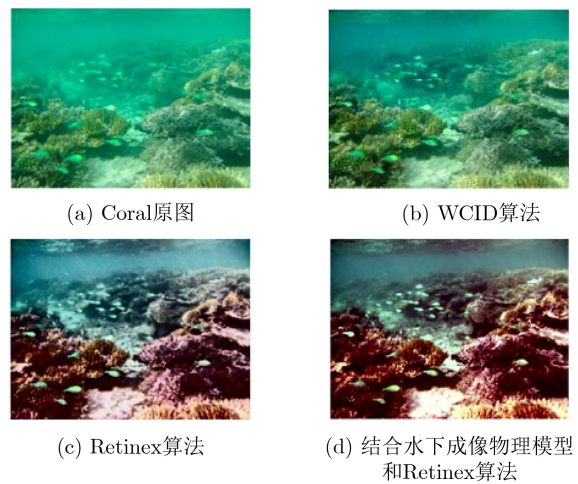


图 7 Coral清晰化对比[46]

表 3 各算法相关指标对比表[45]

图像	指标	原图像	WCID 算法	Retinex 算法	结合Jaffe McGlamery 模型和Retinex算法
Coral	$K$	1.9882	1.3614	1.3479	1.3910
	$C$	29.9062	40.2765	61.0173	64.7464
	GMG	34.2907	41.0527	59.6509	65.1298

强方法不同，该方法侧重于生成性对抗网络和弱监督学习之间的合作，提出的uresnet-p-a模型在水下图像增强中的颜色校正和细节增强处理效果理想，得到的增强图像具有自然颜色和中等对比度。Gao等人[47]提出一个以视网膜的形态和功能为灵感的水下图像增强模型，非均匀色彩校正算法能很好地处理水下图像中的非均匀色彩投射问题，利用颜色敏感的水平细胞对锥体的反馈和红通道补偿来校正非均匀偏色，并采用颜色对抗机制在图像增强过程中灵活调整水下图像的颜色外观。

考虑到水下图像质量退化原因已知，基于物理模型的水下复原方法可因光源造成的颜色失真等问题进行有效校正，根据图像品质的下降过程，建立合理的降质模型，采用某种滤波方法，从而恢复或建立原始图像。针对水下图像颜色失真中存在蓝(绿)色基调不平衡问题，文献[48]通过求各通道颜色衰减因子，对因介质导致的颜色衰减进行补偿；将图像中的蓝(绿)色基调看作光源颜色，利用Shade of Gray算法估计光源颜色后去除。结合Shade of Gray方法有效去除水下图像中的颜色失真，并修正各颜色通道的透射率估计，求得最终的复原图像。文献[49]采用灰度加权对水下图像进行白平衡

校正,应用Von-Kries对焦模型更新颜色通道分量,使其达到白平衡效果,设备还原物体真实颜色。文献[50]基于透射率估计算法,提出新的双透射率估计算法。将双透射率成像模型和原模型相比,模型增加的变量能有效地提升水下图像复原算法中成像模型的完整性。算法恢复后的图像人造光照环境更加自然,且远景的岩石残留的绿色色偏较少,水体的蓝、绿色色偏得到有效的校正,图像整体呈现无色偏状态。

在处理蓝(绿)色基调的前提下,平衡红色通道信息是实现水下图像颜色校正的重要方法。2013年,文献[51]提出了一种水下图像成像模型,利用水下暗通道散射速率估计蓝绿光的传播,采用光衰减差分方法有效估计水下场景的背景光。但因只求蓝、绿通道的暗通道缺少红通道信息而导致得到的散射率偏大、透射率偏小,图像远景处红色分量被过度补偿。2015年,文献[52]提出基于红通道的水下复原算法,通过对红通道反转和添加饱和度分量,减少衰减严重的红通道和人工光源对透射率估计的影响。文献[53]考虑到红色波段的光被水吸收最严重,用电磁波传输理论来估计红色通道的传输系数,有效地估计出背景光及各通道的传输系数,对图像颜色进行补偿。2018年,杨爱萍等人<sup>[54]</sup>融入能够衡量图像衰减特性的红通道信息和能反映人工光源影响的饱和度指标以改进暗通道先验,利用改进后的暗通道先验和红蓝绿通道的衰减系数比得到每个颜色通道的透射率,弥补假设蓝绿通道透射率一致方法的缺陷。

近些年来,研究人员以传统水下图像复原方法为理论基础,就图像复原模型重建改进不断引入新的解决思路。2019年,文献[55]探索水下图像退化和蓝色传输通道之间的关系,提出一种基于深度CNN的端到端水下图像复原算法模型,以改善恢复图像的对比度和颜色投射。采用跨层连接和多尺度估计以保持精细的空间结构与边缘特征,跨层连接用于补偿信息丢失,特别是边缘信息,多尺度估计有助于融合不同尺度的局部图像细节,防止复原图像中出现光晕伪影。文献[56]提出基于余弦相似性的散斑分类和卷积神经网络(CNN)图像重建方法,该组合模型对浑浊度的不确定性具有一定的容忍度,同时保证了高精度的模式分类和高质量的图像重建。该方法在浓度扰动未知的恶劣水溶液中有潜在的应用价值,有待进一步开拓和发展。

### 3 结论和展望

水下成像环境特殊,水下设备进行海底作业或

水下建筑物近距离视频观测时,光照问题以及水下图像颜色失真影响图像质量的关键问题。目前水下光学图像处理问题的研究,已取得可观进展。图像增强方法不考虑水下光学成像机理和光照机理,直接根据降质图像的特征进行处理,但由于没有考虑水下成像机理,不可避免地会产生图像失真问题。图像复原利用光照物理模型去估计图像的降质模式,然后再根据估计的结果复原降质图像,可以较好地实现降质图像的不失真复原,但是仍然存在问题:一是估计介质散射光或景深信息的算法太费时且存在局限性;二是目前采用的水下成像模型大多数没有考虑因人工光源导致的水下光照的不均问题。

虽然当前水下光学图像处理取得了一定进展,但是依然面临很多的挑战,在以下几方面有待进一步研究。

(1) 针对光的散射问题,大部分文献中提出的水下图像清晰化方案只考虑后向散射带来的影响,未考虑前向散射造成的图像细节模糊,纹理信息缺失问题。鉴于此,将前向散射考虑至算法中应该是未来值得探索的一个方向。例如对文献[27]提出采用反卷积处理前向散射的方法进行更深一步的探讨,结合各通道透射率与光学传递函数的数学关系,采用逆滤波实现图像清晰化是去前向散射的改进方向。

(2) 结合水下成像模型和图像增强算法,提出水下图像清晰化方案。将物理模型与图像增强算法优势互补,实现图像的对比度和清晰度大幅提升。采用基于光学成像模型的水下图像超分辨率重构技术与IDCP相结合,超分辨率重构可以去除图像因散射产生的噪声干扰,但对于光照不足、色彩偏离严重的水下图像重构结果提高比较有限,而ID-CP图像增强算法可以除残余色偏,改善颜色失真问题。结合水下成像物理模型和图像增强算法是当前水下图像处理领域的研究热点。

(3) 将相关研究领域的算法及模型引入水下图像处理,如神经网络技术、视网膜模型、深度学习等。但目前该领域所建模型并不精细,大多数研究人员未将前向散射、人工光源以及水的涨落等影响因素考虑在内。在接下来的研究中,可引入水下图像与空气图像的跨域映射函数<sup>[57]</sup>,通过监督学习来纠正影响因素造成的水下图像颜色投射误差。

(4) 由于实际环境对图像处理实时性要求较高,而现有方法其复杂度与实时性相矛盾,当前的图像处理方法大多需要较长的处理时间。在接下来的研究工作中,考虑采用生成对抗网络(generative

adversarial networks)<sup>[58]</sup>, 该方法较为理想地解决了水下图像处理时间效率低的问题, 训练有素的基于GAN-RS的方法可以适应各种水下情况, 达到每秒133.77帧(FPS), 具有出色的实时处理性能。

### 参考文献

- [1] BONIN F, BURGUERA A, and OLIVER G. Imaging systems for advanced underwater vehicles[J]. *Journal of Maritime Research*, 2011, 8(1): 65–86.
- [2] SCHECHNER Y Y and KARPEL N. Clear underwater vision[C]. The 2004 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Washington, USA, 2004: 89–97. doi: [10.1109/CVPR.2004.1315078](https://doi.org/10.1109/CVPR.2004.1315078).
- [3] LU Huimin, LI Yujie, and SERIKAWA S. Computer Vision for Ocean Observing[M]. Artificial Intelligence and Computer Vision. Cham: Springer, 2017, 672: 1–16. doi: [10.1007/978-3-319-46245-5\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-319-46245-5_1).
- [4] 张莉云. 水下图像清晰化算法研究[D]. [硕士论文], 天津大学, 2017.  
ZHANG Liyun. Research on visibility enhancement of underwater images[D]. [Master dissertation], Tianjin University, 2017.
- [5] 冷洁. 水下光学成像系统的研究现状和展望[J]. 激光杂志, 2008, 29(1): 7–8. doi: [10.3969/j.issn.0253-2743.2008.01.003](https://doi.org/10.3969/j.issn.0253-2743.2008.01.003).  
LENG Jie. The investigation and prospect of underwater imaging system[J]. *Laser Journal*, 2008, 29(1): 7–8. doi: [10.3969/j.issn.0253-2743.2008.01.003](https://doi.org/10.3969/j.issn.0253-2743.2008.01.003).
- [6] FOURNIER G R, BONNIER D, FORAND J L, *et al.* LUCIE ROV-mounted laser imaging system[C]. Ocean Optics XI, San Diego, USA, 1992, 1750: 443–452. doi: [10.1117/12.140673](https://doi.org/10.1117/12.140673).
- [7] FOURNIER G R, BONNIER D, FORAND J L, *et al.* Range-gated underwater laser imaging system[J]. *Optical Engineering*, 1993, 32(9): 2185–2190. doi: [10.1117/12.143954](https://doi.org/10.1117/12.143954).
- [8] WEIDEMANN A, FOURNIER G R, FORAND L, *et al.* In harbor underwater threat detection/identification using active imaging[C]. Photonics for Port and Harbor Security, Orlando, USA, 2005: 59–70. doi: [10.1117/12.603601](https://doi.org/10.1117/12.603601).
- [9] TAN C S, SLUZEK A, and SEET G G L. Model of gated imaging in turbid media[J]. *Optical Engineering*, 2005, 44(11): 116002. doi: [10.1117/1.2124567](https://doi.org/10.1117/1.2124567).
- [10] TAN C S, SLUZEK A, SEET GL G, *et al.* Range gated imaging system for underwater robotic vehicle[C]. OCEANS 2006-Asia Pacific, Singapore, 2007: 1–6. doi: [10.1109/oceansap.2006.4393938](https://doi.org/10.1109/oceansap.2006.4393938).
- [11] MINOR L G. Dual mode semi-active laser/laser radar seeker[P]. US, 6262800, 2001.
- [12] JAFFE J S. Development of a laser line scan LIDAR imaging system for AUV use[R]. Award Number: N00014-09-1-0477, 2010.
- [13] CARIOU J, LE JEUNE B, LOTRIAN J, *et al.* Polarization effects of seawater and underwater targets[J]. *Applied Optics*, 1990, 29(11): 1689–1695. doi: [10.1364/ao.29.001689](https://doi.org/10.1364/ao.29.001689).
- [14] 曹念文, 刘文清, 张玉钧. 偏振成像技术提高成像清晰度、成像距离的定量研究[J]. 物理学报, 2000, 49(1): 61–66. doi: [10.3321/j.issn:1000-3290.2000.01.014](https://doi.org/10.3321/j.issn:1000-3290.2000.01.014).  
CAO Nianwen, LIU Wenqing, and ZHANG Yujun. Quantitative study of improvements of the imaging contrast and imaging range by the polarization technique[J]. *Acta Physica Sinica*, 2000, 49(1): 61–66. doi: [10.3321/j.issn:1000-3290.2000.01.014](https://doi.org/10.3321/j.issn:1000-3290.2000.01.014).
- [15] CRONIN T W, SHASHAR N, CALDWELL R L, *et al.* Polarization vision and its role in biological signaling[J]. *Integrative and Comparative Biology*, 2003, 43(4): 549–558. doi: [10.1093/icb/43.4.549](https://doi.org/10.1093/icb/43.4.549).
- [16] TREIBITZ T and SCHECHNER Y Y. Active polarization descattering[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2009, 31(3): 385–399. doi: [10.1109/TPAMI.2008.85](https://doi.org/10.1109/TPAMI.2008.85).
- [17] SCHECHNER Y Y and AVERBUCH Y. Regularized image recovery in scattering media[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2007, 29(9): 1655–1660. doi: [10.1109/tpami.2007.1141](https://doi.org/10.1109/tpami.2007.1141).
- [18] ARNOLD-BOS A, MALKASSE J P, and KERVERN G. Towards a model-free denoising of underwater optical images[C]. Europe Oceans 2005, Brest, France, 2005: 527–532. doi: [10.1109/oceans.2005.1511770](https://doi.org/10.1109/oceans.2005.1511770).
- [19] TREIBITZ T and SCHECHNER Y Y. Turbid scene enhancement using multi-directional illumination fusion[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2012, 21(11): 4662–4667. doi: [10.1109/TIP.2012.2208978](https://doi.org/10.1109/TIP.2012.2208978).
- [20] HARDY K, CAMERON J, HERBST L, *et al.* Hadal landers: The DEEPSEA CHALLENGE ocean trench free vehicles[C]. 2013 OCEANS - San Diego, San Diego, USA, 2013: 1–10.
- [21] ROSER M, DUNBABIN M, and GEIGER A. Simultaneous underwater visibility assessment, enhancement and improved stereo[C]. 2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), Hong Kong, China, 2014: 3840–3847. doi: [10.1109/icra.2014.6907416](https://doi.org/10.1109/icra.2014.6907416).
- [22] GARCIA R, NICOSEVICI T, and CUFI X. On the way to solve lighting problems in underwater imaging[C]. OCEANS'02 MTS/IEEE, Biloxi, USA, 2002: 1018–1024. doi: [10.1109/oceans.2002.1192107](https://doi.org/10.1109/oceans.2002.1192107).
- [23] JIANG Qin, WANG Guoyu, GONG Benxing, *et al.* A novel approach to underwater de-scattering based on sparse and low-rank matrix decomposition[C]. OCEANS - MTS/IEEE Kobe Techno-Oceans, Kobe, Japan, 2018: 1–4. doi: [10.1109/oceanskobe.2018.85591](https://doi.org/10.1109/oceanskobe.2018.85591).
- [24] PAN Panwang, YUAN Fei, and CHENG En. Underwater image de-scattering and enhancing using dehazenet and

- HWD[J]. *Journal of Marine Science and Technology*, 2018, 26(4): 531–540.
- [25] LU Huimin, LI Yujie, UEMURA T, *et al.* Low illumination underwater light field images reconstruction using deep convolutional neural networks[J]. *Future Generation Computer Systems*, 2018, 82: 142–148. doi: [10.1016/j.future.2018.01.001](https://doi.org/10.1016/j.future.2018.01.001).
- [26] LI Yujie, LU Huimin, LI K C, *et al.* Non-uniform de-scattering and de-blurring of underwater images[J]. *Mobile Networks and Applications*, 2018, 23(2): 352–362. doi: [10.1007/s11036-017-0933-7](https://doi.org/10.1007/s11036-017-0933-7).
- [27] 张颢, 范新南, 李敏, 等. 基于光学成像模型的水下图像超分辨率重构[J]. *计算机与现代化*, 2017(4): 7–13. doi: [10.3969/j.issn.1006-2475.2017.04.002](https://doi.org/10.3969/j.issn.1006-2475.2017.04.002).  
ZHANG Hao, FAN Xinnan, LI Min, *et al.* Underwater image super-resolution reconstruction based on optical imaging model[J]. *Computer and Modernization*, 2017(4): 7–13. doi: [10.3969/j.issn.1006-2475.2017.04.002](https://doi.org/10.3969/j.issn.1006-2475.2017.04.002).
- [28] 王鑫, 朱行成, 宁晨, 等. 融合暗原色先验和稀疏表示的水下图像复原[J]. *电子与信息学报*, 2018, 40(2): 264–271. doi: [10.11999/jcit170381](https://doi.org/10.11999/jcit170381).  
WANG Xin, ZHU Xingcheng, NING Chen, *et al.* Combination of dark-channel prior with sparse representation for underwater image restoration[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2018, 40(2): 264–271. doi: [10.11999/jcit170381](https://doi.org/10.11999/jcit170381).
- [29] PAN Panwang, YUAN Fei, and CHENG En. De-scattering and edge-enhancement algorithms for underwater image restoration[J]. *Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering*, 2019, 20(6): 862–871.
- [30] ANCUTI C, ANCUTI C O, HABER T, *et al.* Enhancing underwater images and videos by fusion[C]. *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, Providence, USA, 2012: 81–88. doi: [10.1109/cvpr.2012.6247661](https://doi.org/10.1109/cvpr.2012.6247661).
- [31] TAO Li and ASARI V K. Adaptive and integrated neighborhood-dependent approach for nonlinear enhancement of color images[J]. *Journal of Electronic Imaging*, 2005, 14(4): 043006. doi: [10.1117/1.2136903](https://doi.org/10.1117/1.2136903).
- [32] 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.
- [33] 王彬. 基于改进等功率谱法的水下图像增强[J]. *中国科技信息*, 2009(19): 46–47. doi: [10.3969/j.issn.1001-8972.2009.19.017](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-8972.2009.19.017).  
WANG Bin. Underwater image enhancement based on improved equal power spectral method[J]. *China Science and Technology Information*, 2009(19): 46–47. doi: [10.3969/j.issn.1001-8972.2009.19.017](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-8972.2009.19.017).
- [34] 汪荣贵, 朱静, 杨万挺, 等. 基于照度分割的局部多尺度Retinex算法[J]. *电子学报*, 2010, 38(5): 1181–1186.  
WANG Ronggui, ZHU Jing, YANG Wanting, *et al.* An improved local multi-scale Retinex algorithm based on illuminance image segmentation[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2010, 38(5): 1181–1186.
- [35] 李庆忠, 李长顺, 王中琦. 基于小波变换的水下降质图像复原算法[J]. *计算机工程*, 2011, 37(22): 202–203, 206. doi: [10.3969/j.issn.1000-3428.2011.22.067](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-3428.2011.22.067).  
LI Qingzhong, LI Changshun, and WANG Zhongqi. Restoration algorithm for degraded underwater image based on wavelet transform[J]. *Computer Engineering*, 2011, 37(22): 202–203, 206. doi: [10.3969/j.issn.1000-3428.2011.22.067](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-3428.2011.22.067).
- [36] 郭相凤, 贾建芳, 杨瑞峰, 等. 基于水下图像光学成像模型的清晰化算法[J]. *计算机应用*, 2012, 32(10): 2836–2839. doi: [10.3724/SP.J.1087.2012.02836](https://doi.org/10.3724/SP.J.1087.2012.02836).  
GUO Xiangfeng, JIA Jianfang, YANG Ruifeng, *et al.* Visibility enhancing algorithm based on optical imaging model for underwater images[J]. *Journal of Computer Application*, 2012, 32(10): 2836–2839. doi: [10.3724/SP.J.1087.2012.02836](https://doi.org/10.3724/SP.J.1087.2012.02836).
- [37] ZHOU Jianjun and ZHOU Fugen. Single image dehazing motivated by Retinex theory[C]. *The 2nd International Symposium on Instrumentation and Measurement, Sensor Network and Automation*, Toronto, Canada, 2013: 243–247.
- [38] IQBAL K, SALAM R A, OSMAN A, *et al.* Underwater image enhancement using an integrated colour model[J]. *International Journal of Computer Science*, 2007, 34(2): 239–244.
- [39] 徐岩, 马硕, 王权威. 一种利用前景模型的水下图像增强算法[J]. *小型微型计算机系统*, 2017, 38(12): 2802–2806. doi: [10.3969/j.issn.1000-1220.2017.12.033](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-1220.2017.12.033).  
XU Yan, MA Shuo, and WANG Quanwei. Underwater image enhancement algorithm using foreground modeling[J]. *Journal of Chinese Computer Systems*, 2017, 38(12): 2802–2806. doi: [10.3969/j.issn.1000-1220.2017.12.033](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-1220.2017.12.033).
- [40] LI Yujie, LU Huimin, LI Jianru, *et al.* Underwater image de-scattering and classification by deep neural network[J]. *Computers & Electrical Engineering*, 2016, 54: 68–77. doi: [10.1016/j.compeleceng.2016.08.008](https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2016.08.008).
- [41] CHIANG J Y and CHEN Yingching. Underwater image enhancement by wavelength compensation and dehazing[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2012, 21(4): 1756–1769. doi: [10.1109/tip.2011.2179666](https://doi.org/10.1109/tip.2011.2179666).
- [42] 汤忠强, 周波, 戴先中, 等. 基于改进DCP算法的水下机器人视觉增强[J]. *机器人*, 2018, 40(2): 222–230. doi: [10.13973/j.cnki.robot.170251](https://doi.org/10.13973/j.cnki.robot.170251).  
TANG Zhongqiang, ZHOU Bo, DAI Xianzhong, *et al.* Underwater robot visual enhancements based on the improved DCP algorithm[J]. *Robot*, 2018, 40(2): 222–230. doi: [10.13973/j.cnki.robot.170251](https://doi.org/10.13973/j.cnki.robot.170251).
- [43] FU Xueyang, ZHUANG Peixian, HUANG Yue, *et al.* A

- retinex-based enhancing approach for single underwater image[C]. IEEE International Conference on Image Processing (ICIP), Paris, France, 2014: 4572–4576. doi: [10.1109/icip.2014.7025927](https://doi.org/10.1109/icip.2014.7025927).
- [44] TANG Chong, VON LUKAS U F, VAHL M, *et al.* Efficient underwater image and video enhancement based on Retinex[J]. *Signal, Image and Video Processing*, 2019, 13(5): 1011–1018. doi: [10.1007/s11760-019-01439-y](https://doi.org/10.1007/s11760-019-01439-y).
- [45] 杨爱萍, 张莉云, 曲畅, 等. 基于加权 $L_1$ 正则化的水下图像清晰化算法[J]. 电子与信息学报, 2017, 39(3): 626–633. doi: [10.11999/JEIT160481](https://doi.org/10.11999/JEIT160481).
- YANG Aiping, ZHANG Liyun, QU Chang, *et al.* Underwater images visibility improving algorithm with weighted  $L_1$  regularization[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2017, 39(3): 626–633. doi: [10.11999/JEIT160481](https://doi.org/10.11999/JEIT160481).
- [46] LIU Peng, WANG Guoyu, QI Hao, *et al.* Underwater image enhancement with a deep residual framework[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 94614–94629. doi: [10.1109/access.2019.2928976](https://doi.org/10.1109/access.2019.2928976).
- [47] GAO Bingshao, ZHANG Ming, ZHAO Qian, *et al.* Underwater image enhancement using adaptive retinal mechanisms[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2019, 28(11): 5580–5595. doi: [10.1109/TIP.2019.2919947](https://doi.org/10.1109/TIP.2019.2919947).
- [48] 杨爱萍, 郑佳, 王建, 等. 基于颜色失真去除与暗通道先验的水下图像复原[J]. 电子与信息学报, 2015, 37(11): 2541–2547. doi: [10.11999/JEIT150483](https://doi.org/10.11999/JEIT150483).
- YANG Aiping, ZHENG Jia, WANG Jian, *et al.* Underwater image restoration based on color cast removal and dark channel prior[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2015, 37(11): 2541–2547. doi: [10.11999/JEIT150483](https://doi.org/10.11999/JEIT150483).
- [49] 胡学龙, 张文, 胡铸鑫, 等. 一种改进的暗通道先验水下彩色图像复原算法[J]. 扬州大学学报: 自然科学版, 2018, 21(4): 37–41. doi: [10.19411/j.1007-824x.2018.04.009](https://doi.org/10.19411/j.1007-824x.2018.04.009).
- HU Xuelong, ZHANG Wen, HU Zhuxin, *et al.* Underwater color image restoration algorithm based on improved prior dark-channel model[J]. *Journal of Yangzhou University: Natural Science Edition*, 2018, 21(4): 37–41. doi: [10.19411/j.1007-824x.2018.04.009](https://doi.org/10.19411/j.1007-824x.2018.04.009).
- [50] 王国霖, 田建东, 李鹏越. 基于双透射率水下成像模型的图像颜色校正[J]. 光学学报, 2019, 39(9): 0901002. doi: [10.3788/AOS201939.0901002](https://doi.org/10.3788/AOS201939.0901002).
- WANG Guolin, TIAN Jiandong, and LI Pengyue. Image color correction based on double transmission underwater imaging model[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(9): 0901002. doi: [10.3788/AOS201939.0901002](https://doi.org/10.3788/AOS201939.0901002).
- [51] WEN Haocheng, TIAN Yonghong, HUANG Tiejun, *et al.* Single underwater image enhancement with a new optical model[C]. IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS), Beijing, China, 2013: 753–756. doi: [10.1109/iscas.2013.6571956](https://doi.org/10.1109/iscas.2013.6571956).
- [52] 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. doi: [10.1016/j.jvcir.2014.11.006](https://doi.org/10.1016/j.jvcir.2014.11.006).
- [53] 蒋泽新, 朴燕. 基于电磁理论的水下图像色彩补偿[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(8): 081006. doi: [10.3788/LOP55.081006](https://doi.org/10.3788/LOP55.081006).
- JIANG Zexin and PIAO Yan. Underwater image color compensation based on electromagnetic theory[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(8): 081006. doi: [10.3788/LOP55.081006](https://doi.org/10.3788/LOP55.081006).
- [54] 杨爱萍, 曲畅, 王建, 等. 基于水下成像模型的图像清晰化算法[J]. 电子与信息学报, 2018, 40(2): 298–305. doi: [10.11999/JEIT170460](https://doi.org/10.11999/JEIT170460).
- YANG Aiping, QU Chang, WANG Jian, *et al.* Underwater image visibility restoration based on underwater imaging model[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2018, 40(2): 298–305. doi: [10.11999/JEIT170460](https://doi.org/10.11999/JEIT170460).
- [55] WANG Keyan, HU Yan, CHEN Jun, *et al.* Underwater image restoration based on a parallel convolutional neural network[J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(13): 1591. doi: [10.3390/rs11131591](https://doi.org/10.3390/rs11131591).
- [56] ZHOU Linan, XIAO Yin, and CHEN Wen. Imaging through turbid media with vague concentrations based on cosine similarity and convolutional neural network[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2019, 11(4): 7801315. doi: [10.1109/JPHOT.2019.2927746](https://doi.org/10.1109/JPHOT.2019.2927746).
- [57] LI Chongyi, GUO Jichang, and GUO Chunle. Emerging from water: underwater image color correction based on weakly supervised color transfer[J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 2018, 25(3): 323–327. doi: [10.1109/LSP.2018.2792050](https://doi.org/10.1109/LSP.2018.2792050).
- [58] CHEN Xingyu, YU Junzhi, KONG Shihan, *et al.* Towards real-time advancement of underwater visual quality with GAN[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2019, 66(12): 9350–9359. doi: [10.1109/TIE.2019.2893840](https://doi.org/10.1109/TIE.2019.2893840).
- 郭银景: 男, 1966年生, 教授, 研究方向为无线通信、图像信息处理、AUV导航与控制等。
- 吴琪: 女, 1997年生, 硕士生, 研究方向为信号与信息处理。
- 苑娇娇: 女, 1996年生, 硕士生, 研究方向为通信与信息系统。
- 侯佳辰: 女, 1998年生, 硕士生, 研究方向为电子与通信工程。
- 吕文红: 女, 1968年生, 教授, 研究方向为导航与通信系统、运筹学与最优化方法等。