

水下图像处理技术研究综述

林明星^{1,2,3}, 代成刚^{1,2,3}, 董雪⁴, 张东⁵, 管志光⁶

(1. 山东大学机械工程学院, 山东 济南 250061; 2. 高效洁净机械制造教育部重点实验室, 山东 济南 250061;
3. 机械工程国家级实验教学示范中心(山东大学), 山东 济南 250061; 4. 山东交通职业学院机电工程系, 山东 潍坊 261000; 5. 山东省科学院自动化研究所, 山东 济南 250013; 6. 山东交通学院工程机械学院, 山东 济南 250023)

摘要: 随着自主式水下机器人的发展, 水下探测技术成为新的研究热点。然而, 吸收效应和散射效应导致水下获取的图像存在雾化和色彩偏差等缺陷。降质的水下图像在一定程度上降低了水下目标识别的准确性。为了改善水下图像质量, 国内外学者对水下图像处理方法进行了深入研究。因水下图像处理方法对提升水下目标识别准确性具有良好的促进作用, 故其具有重要的研究与分析价值。介绍了水下成像模型, 分析了水下图像视觉质量下降的原理; 根据水下物理成像模型将水下图像处理方法分为水下图像增强与水下图像复原, 并分别对两类方法的研究现状进行分析与归纳; 最后, 总结与讨论了各类方法的优缺点, 并展望了未来的发展方向。

关键词: 水下光视觉成像; 水下光视觉信号处理; 水下图像增强; 水下图像复原

中图分类号: TP37 **文献标识码:** A

doi: 10.19708/j.ckjs.2020.03.211

Survey of Underwater Image Processing Technology

LIN Ming-xing^{1,2,3}, DAI Cheng-gang^{1,2,3}, DONG Xue⁴, ZHANG Dong⁵, GUAN Zhi-guang⁶

(1. School of Mechanical Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China; 2. Key Laboratory of High-Efficiency and Clean Mechanical Manufacture of Ministry of Education, Jinan 250061, China; 3. National Demonstration Center for Experimental Mechanical Engineering Education (Shandong University), Jinan 250061, China; 4. Technical and Electrical Engineering Department, Shandong Transport Vocational College, Weifang 261000, China; 5. Institute of Automation Shandong Academy of Sciences, Jinan 250013, China; 6. School of Construction Machinery, Shandong Jiaotong University, Jinan 250023, China)

Abstract: Underwater detection technology has become a new research focus with the development of autonomous underwater vehicles. However, underwater images present hazy sense and color deviation due to the scattering and absorption effects of underwater light. The degraded underwater images diminish the accuracy of underwater target recognition to some extent. In order to improve the quality of underwater images, many scholars have made profound researches on underwater image processing methods. The underwater image processing method improves the accuracy of underwater target recognition, which is worth to study and analyze. Accordingly, the underwater imaging model is introduced, and the mechanism of degradation of underwater image visual quality is analyzed. Furthermore, underwater image processing methods are classified to underwater image enhancement and underwater image restoration approaches according to the underwater imaging model, and the research status of these methods are analyzed and summarized respectively. Finally, the advantages and disadvantages are discussed.

收稿日期: 2019-12-12

基金项目: 山东省重点研发计划(重大科技创新工程)(2019JZZY020703)

作者简介: 林明星(1966—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为视觉检测、图像处理。

引用格式: 林明星, 代成刚, 董雪, 等. 水下图像处理技术研究综述[J/OL]. 测控技术: 1-14. https://doi.org/10.19708/j.ckjs.2020.03.211.

LIN M X, DAI C G, DONG X, et al. Survey of Underwater Image Processing Technology[J/OL]. Measurement & Control Technology: 1-14. https://doi.org/10.19708/j.ckjs.2020.03.211.

vantages of the various methods are summarized and discussed, and the future development direction is prospected.

Key words: underwater optical visual imaging; underwater optical visual signal processing; underwater image enhancement; underwater image restoration

水下机器人是人类探索与开发海洋的重要装备之一,而水下机器人获取水下环境信息需通过探测系统^[1-2]。如图1所示,探测系统作为水下机器人的“眼睛”,是通过相机、声呐等传感器感知水下环境并对水中目标进行识别与分析。水下探测系统一方面对目标进行识别,为机器人提供水下目标的位置信息,另一方面可以将提取的环境信息抽象为可供机器人决策的输入参数,故探测系统是水下机器人探测海洋的核心组成部分^[3-4]。随着自主式水下机器人的发展,水下探测技术日渐成为水下机器人中的关键研究内容,其以图像处理与分析为基础。因此,无论是在海洋探索与开发领域,还是在其他工程应用领域,水下图像处理技术都具有极为重要的研究意义。

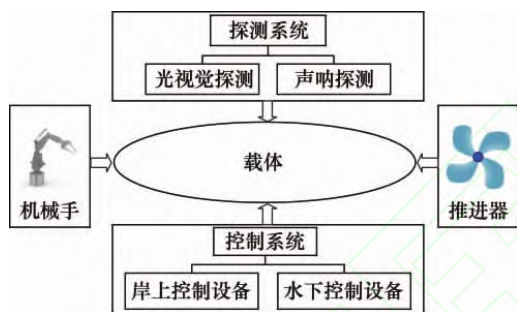


图1 水下机器人结构示意图

按照成像原理,水下图像可分为:光视觉图像和声呐图像^[5-6]。相比光视觉信号,声呐信号在水中衰减较小,传播特性好,所以利用声呐可进行水下远距离目标定位与探测。但光波比声波传播速度快,故光视觉探测具有更好的实时性;且基于光视觉信号的识别技术不受反射噪声的干扰,图像细节丰富,因而识别率更高^[7]。此外,光学系统生成的图像更符合人眼观测习惯,便于进一步分析与处理。因此,基于光视觉的探测技术在水下近距离探测作业中有着声呐探测技术无法比拟的优势。鉴于此,本文着重分析光视觉图像方面的处理技术。

1 水下成像模型

光在水中传播时,受到微粒和杂质的散射以及水介质的吸收作用而产生强烈的衰减^[8-10]。散射是光沿着直线传播时发生的小角度偏转现象;吸收是光在传播过程中引起的能量损失。根据 Jaffe-McGlamery 水下成像模型,如图2所示,水下图像可以表示为3个

分量相加(如式1所示)^[11-12]:①直接衰减分量,表示被水下物体反射而未发生散射的光;②前向散射分量,表示物体反射光到达照相机的过程中射入微粒而发生小角度散射的光;③后向散射分量,表示周围环境的反射光经微粒散射后的光,如周围环境的反射光经悬浮杂质散射后进入相机的部分。

$$E_r^c(x, y) = E_d^c(x, y) + E_f^c(x, y) + E_b^c(x, y) \quad c \in \{R, G, B\} \quad (1)$$

其中,直接衰减分量的光强表达式为^[11-12]

$$E_d^c(x, y) = E^c(x, y) \exp[-a(c)d(x, y)] \quad (2)$$

式中, x, y 分别为像素的横纵坐标; c 为图像的红、绿、蓝3个颜色通道; $E^c(x, y)$ 为水下物体的反射光(即未经衰减的真实场景); $d(x, y)$ 为相机到物体的距离; $a(c)$ 为衰减系数,包含由吸收效应和散射效应造成的衰减,因水介质对不同频率的光的衰减程度不同,故衰减系数 $a(c)$ 将随颜色通道的变化而变化,从而导致水下图像呈现出蓝绿色偏。

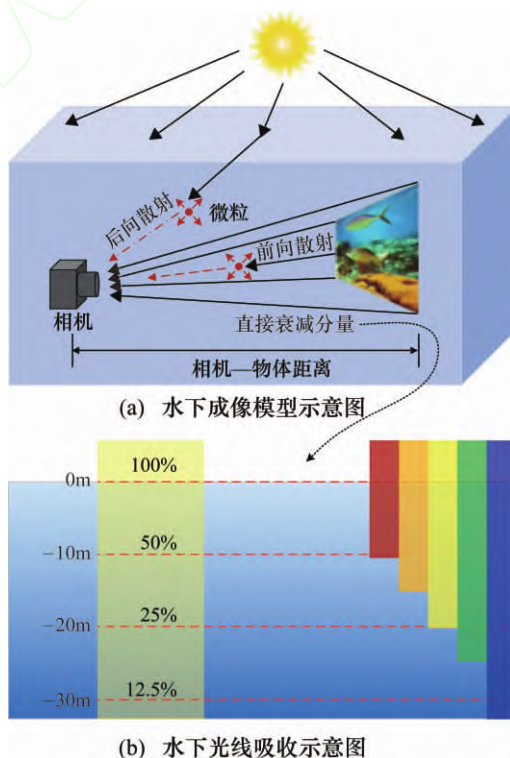


图2 水下成像模型及水下光线吸收示意图

前向散射分量将导致水下获取的图像模糊,其光强可通过点扩展函数 $g^c(x, y)$ 卷积直接衰减分量 $E_d^c(x, y)$ 获得^[11-12]:

$$E_f^c(x, y) = g^c(x, y) \otimes E_d^c(x, y) \quad (3)$$

式中, “ \otimes ”表示卷积运算;点扩展函数 $g^c(x, y)$ 定义为^[11-12]

$$g^c(x, y) = F^{-1} \{ \exp[-Bd(x, y)] f \} \cdot \{ \exp[-Gd(x, y)] - \exp[-a(c)d(x, y)] \} \quad (4)$$

式中, F^{-1} 为傅里叶逆变换; B 和 G 为经验常数, 满足 $|G| < a(c)$; f 为图像空间频率; “ \cdot ”表示点对点相乘。

后向散射分量光强表达式为^[11-12]

$$E_b^c(x, y) = B_\infty(c) \{ 1 - \exp[-a(c)d(x, y)] \} \quad (5)$$

式中, $B_\infty(c)$ 为背景光。将上述3个分量表达式带入式(1), 可得相机在水下获取的总光强:

$$E_T^c(x, y) = E^c(x, y) \exp[-a(c)d(x, y)] + B_\infty(c) \{ 1 - \exp[-a(c)d(x, y)] \} + g^c(x, y) \otimes \{ E^c(x, y) \exp[-a(c)d(x, y)] \} \quad (6)$$

当物体与相机距离较小时, 前向散射分量忽略不计, 总光强表达式简化为^[5-6, 11-12]

$$E_T^c(x, y) = E^c(x, y) \exp[-a(c)d(x, y)] + B_\infty(c) \{ 1 - \exp[-a(c)d(x, y)] \} \quad (7)$$

由水下成像模型可知, 光在水中传播时, 散射作用导致水下获取的图像模糊与雾化; 吸收作用导致水下图像颜色失真^[6]。因此, 水下获取的图像存在模糊、对比度低以及色彩偏差等缺陷, 降质的图像会对后续的特征提取与目标识别造成巨大影响。因而, 水下图像清晰化技术在水下探测任务中起着至关重要的作用。

2 水下图像处理方法

根据是否基于水下成像模型, 水下图像处理的方法分为水下图像增强方法和水下图像复原方法。水下图像增强方法仅采用计算机图形学方法达到图像清晰化的目的, 算法实施过程并不考虑物理成像过程。水下图像复原方法旨在逆求解水下成像模型以获得复原的水下图像^[13], 算法过程依赖于水下图像退化模型。水下图像处理方法分类如图3所示。

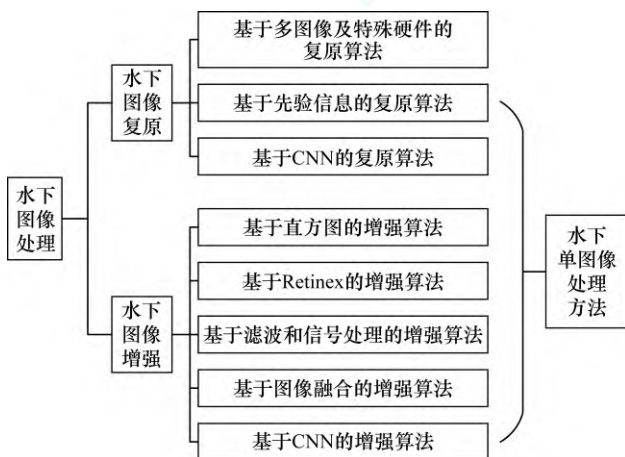


图3 水下图像处理方法分类

2.1 水下图像增强

水下图像增强方法不考虑物理成像过程, 也无需预先获取水体的光学参数。该类方法直接运用图像处理方法达到图像清晰化的目的, 主要包括: 基于直方图的增强算法、基于Retinex的增强算法、基于滤波和信息处理的增强算法、基于图像融合的增强算法和基于卷积神经网络(Convolutional Neural Network, CNN)的增强算法^[14]。

2.1.1 基于直方图的水下图像增强算法

基于直方图的图像增强算法是应用较为广泛的一类图像增强方法, 该类算法的思想是将图像直方图从较窄的单峰式直方图变换为均衡分布的直方图, 如图4所示。

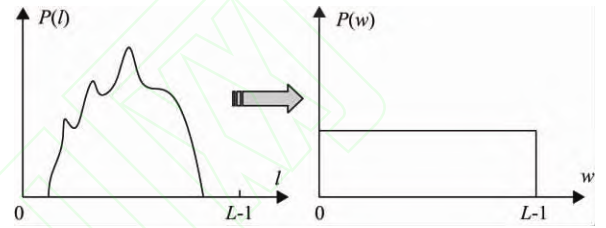


图4 直方图均衡化

设 l 和 w 分别为原图像和经直方图均衡化(Histogram Equalization, HE)的图像灰度级 L , 对 l 和 w 进行归一化, 使得 l 和 w 保持在 $[0, 1]$ 区间, 若对 l 按如下公式进行变换:

$$w = T(l), 0 \leq l \leq 1, 0 \leq w \leq 1 \quad (8)$$

$T(l)$ 在 $[0, 1]$ 内为单调函数。相反, 从 w 到 l 的反变换为

$$l = T^{-1}(w), 0 \leq l \leq 1, 0 \leq w \leq 1 \quad (9)$$

若概率密度函数 $P(l)$ 和变换函数 $w = T(l)$ 已知, 则变换后的图像灰度级的概率密度函数 $P(w)$ 表示为

$$P(w) = P(l) \frac{dl}{dw} \Big|_{l=T^{-1}(w)} \quad (10)$$

假设变换函数为 $P(l)$ 的累计分布:

$$w = T(l) = \int_0^l P(l) dl \quad (11)$$

由式(11)可知变换函数为 l 的累计分布函数时, 有

$$\frac{dw}{dl} = \frac{dT(l)}{dl} = P(l) \quad (12)$$

将式(12)代入式(10)有

$$P(w) = P(l) \frac{1}{dw/dl} \Big|_{l=T^{-1}(w)} = P(l) \frac{1}{P(l)} = 1 \quad (13)$$

由此可知, HE 正是以输入图像的累计分布函数为变换函数的直方图修正技术。HE 是基于直方图的增强算法中最基础的算法^[15]。该算法通过像素值变换使原图像变换为在大多数灰度等级上都有大致相同像素个数的输出图像, 该算法简单、速度快。如图5所

示,水下原图像模糊、对比度低,灰度级集中于较窄的动态范围。处理后的图像各颜色通道的直方图分布均匀,占满整个灰度级空间。从图像的视觉表现来看,场景的亮度和可见性得到提升,对比度较原图像高,如图6所示。

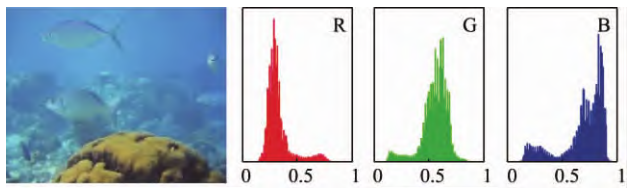


图5 水下图像及其 RGB 通道直方图

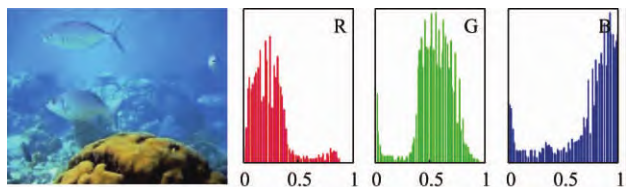


图6 直方图均衡算法处理后的图像及其 RGB 通道直方图

然而,对于景深复杂、模糊程度不均匀的图像,HE难以改善图像局部的对比度,导致图像局部区域过度增强、细节信息丢失;且由于对R通道过度补偿,近距离的景物呈现出红色调,场景颜色出现失真现象。为改善HE的缺陷,Pizer^[16]等人提出自适应直方图均衡算法(Adaptive Histogram Equalization, AHE)。AHE通过计算图像的局部直方图,以重新分布亮度来改变图像对比度,故该算法可改善图像的局部对比度。为了提高AHE算法的性能,Zuiderveld^[17]提出限制对比度自适应直方图均衡化(Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization, CLAHE)。CLAHE最早应用在医学图像领域,是AHE的改进版,克服了AHE的局限性。为了提高该算法的处理速度,CLAHE使用线性插值的方式提升效率,实验证明插值结果几乎不影响算法效果。在CLAHE的基础上,Hitam^[18]等人提出一种混合限制对比度自适应直方图算法,该算法首先使用CLAHE算法对水下图像的HSV通道和RGB通道分别进行增强,并使用欧氏范数对上述处理结果进行融合,成功地抑制了CLAHE算法引起的图像噪声和色彩失真。此外,Singh^[19]等人提出两种基于曝光的递归直方图均衡化图像增强方法,这两种方法对于水下图像或夜间图像等低曝光条件下获取的图像效果较好。第一种方法是基于递归曝光的子图像直方图均衡化,该方法递归执行基于曝光的子图像直方图均衡化,直到迭代过程中的曝光残差小于预定阈值。第二种方法被称为基于递归分离曝光的子图像直方图均衡化,该方法递归执行图像直方图分离;再根据各自的曝光阈值进一步分离每个新直方图,并对每个子直方图进行均

衡化。该方法适用于低光照图像,可有效的解决HE无法解决低照度图像增强问题,但未能有效解决颜色失真问题。近年,Ghani^[20]等人提出综合全局和局部对比度校正的低质量水下图像增强算法——双图像瑞利拉伸-限制对比度自适应直方图规定化。该方法综合考虑全局和局部对比度,算法分为两个步骤:颜色校正和对比度拉伸。首先通过全局对比度校正生成对比度增强的图像,其次对图像局部区域进行对比度拉伸以增强图像的纹理和细节,最后对图像色彩进行校正达到改善图像饱和度和亮度的目的。定性和定量评价表明,双图像瑞利拉伸-限制对比度自适应直方图规定化能显著增强图像的对比度,锐化图像细节和纹理,并能在一定程度上纠正水下图像的色偏。

2.1.2 基于Retinex的水下图像增强算法

Land^[21]等人从人眼对颜色的感知特性出发,提出基于颜色恒常性的Refinex理论,该理论模型如图7所示。Refinex理论包含两方面内容:物体对不同波长光线的反射率决定了物体的真实颜色;另外,物体的颜色不受光照不均匀的影响。基于Refinex理论,一幅图像 $I^c(x, y)$ 可以表示为照度分量和反射分量的乘积^[21]:

$$I^c(x, y) = R^c(x, y) \cdot L^c(x, y) \quad (14)$$

式中, $R^c(x, y)$ 为反射分量, $L^c(x, y)$ 为照度分量,“ \cdot ”表示像素点对点相乘。Retinex算法的目的是消除照射分量 $L^c(x, y)$ 对物体颜色的影响,得到物体的反射分量 $R^c(x, y)$,即去除光照不均匀的影响,从而获得场景的真实面貌,实现图像增强。

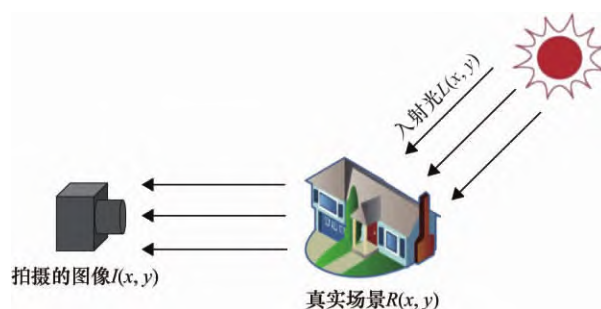


图7 Retinex模型示意图

根据Retinex理论,Jobson等人提出多尺度Retinex(Multi-Scale Retinex, MSR)增强算法^[22]和带色彩恢复的多尺度Retinex(Multi-Scale Retinex with Color Restoration, MSRCR)增强算法^[23]。MSR算法将原图像 $I^c(x, y)$ 进行高斯模糊作为 $L^c(x, y)$ 的估计值。考虑到 $L^c(x, y)$ 包含多个低频分量,Jobson等人采用多尺度高斯卷积模板对 $I^c(x, y)$ 进行模糊,并进行加权平均,如式(15)所示^[22]:

$$R_{\text{MSR}}^c(x, y) = \sum_k^K \omega_k \{ \log I^c(x, y) - \log F_k \otimes I^c(x, y) \} \quad (15)$$

$$F_k = \frac{1}{2\pi\sigma_k^2} \exp\left(-\frac{D^2}{2\pi\sigma_k^2}\right) \quad (16)$$

式中, $R_{MSR}^c(x, y)$ 为 MSR 的输出结果; F_k 为 k 个尺度高斯卷积模板; D 为高斯模板中指定点到模板中心的距离; σ_k 为方差。

MSRCR 算法则是在 MSR 算法基础上对其输出结果依次进行色彩平衡 Q^c 、色彩补偿 b 和增益 Gr , 从而达到图像增强的目的。MSRCR 算法流程如下^[23]:

$$R_{MSRCR}^c(x, y) = Q^c R_{MSR}^c(x, y) \quad (17)$$

$$Q^c = \beta \log \left[\alpha \frac{F^c(x, y)}{\sum_{c \in \{R, G, B\}} F^c(x, y)} \right] \quad (18)$$

$$R_{Final}^c(x, y) = Gr [R_{MSRCR}^c(x, y) + b] \quad (19)$$

式中, α 和 β 为两个正调节因子; $R_{Final}^c(x, y)$ 为 MSRCR 算法的最终输出图像。

为了改善 MSRCR 的性能, McCann^[24] 等人提出两种改进算法: McCann-Retinex 和 McCann99-Retinex。前者是基于迭代策略的 Retinex 算法, 每个点的像素值取决于特定路线环绕的结果, 通过不断迭代逼近理想值。该方法通过比较螺旋式路径上的各个像素点的灰度值来去除照度分量。McCann99-Retinex 算法本质上与 McCann-Retinex 算法相似, 两者的不同点为: McCann99 算法不采用环绕式的路径来估计像素点的灰度值, 而是用图像金字塔的方式逐层选取以确定图像像素值。但上述 3 种方法未考虑图像中物体边缘的突变, 在处理水下图像时, 有轻微的光晕现象, 光晕现象如图 8 所示。此外, Zhou 提出一种新的水下自动图像增强算法, 将基于 HVS 色彩空间的多尺度 Retinex 算法应用到 Nonsubsampled Contourlet (NSCT) 域中, 以消除非均匀光照, 并采用阈值去噪技术抑制水下噪声。实验结果表明, 该算法能够同时实现对比度增强、图像去噪和边缘锐化, 但在物体边缘处仍有光晕现象^[25]。

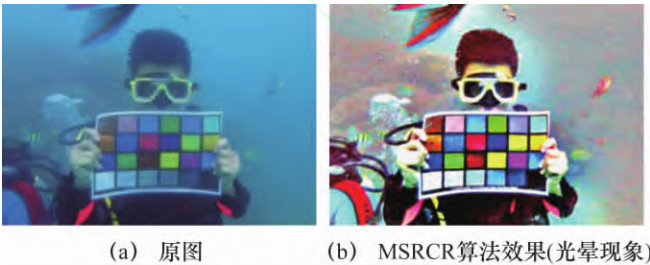


图 8 水下图像光晕现象

为消除光晕现象, 中国海洋大学 Zhang^[26] 等人提出扩展多尺度 Retinex 的水下图像增强算法 (Lab-MSR), 将 MSRCR 算法扩展到 CIELAB 颜色空间, 对 L 通道使用双边滤波, 对 a 和 b 通道使用三边滤波分别进行模糊, 成功抑制图像增强过程中产生的光晕现象, 如图 9 所示。



图 9 MSRCR 算法与 Lab-MSR 算法对比

近年来, 随着水下机器人技术的发展, Mercado^[27] 等人提出基于多尺度 Retinex 和反向颜色损失的深海暗图像增强。因 Retinex 理论是基于大气环境中的人类视觉特性, 未考虑光在水中的衰减, 故 Mercado 采用比尔-朗伯定律估计出光衰减的百分比, 并按该比例对原始图像进行补偿, 实现多尺度 Retinex 与逆向颜色损失相结合, 使之适用于深海图像增强。基于 Retinex 理论, 傅雪阳^[28] 等人通过变分技术将颜色矫正后的水下图像分解为照度分量和反射率分量, 再采用直方图规范化技术对照度分量进行处理以防止过度曝光, 并采用 CLAHE 对反射分量进行动态范围拉伸, 最后将处理后的反射分量和照度分量相乘, 从而输出清晰的水下图像 (Total Variation for Image Enhancement, TVIE), 实验结果表明该方法对微光图像也具有一定的增强效果。此外, 山东大学林明星^[29] 等人对 TVIE 方法进行改进, 提出两用图像增强算法 (Dual-Purpose Image Enhancement, DPIE), 该方法基于 Retinex 理论及变分技术, 并引入 L1 正则项, 成功地抑制了水下图像增强过程中产生的噪声, 实验结果表明该方法对水下图像和低照度图像都有较好的效果。

2.1.3 基于滤波和信号处理的水下图像增强算法

图像的滤波技术分为空间域滤波和频率域滤波两类。根据所使用的滤波模板的不同, 空间域滤波一般有中值滤波、均值滤波、高斯滤波、图像锐化的梯度算子等。频率域滤波有低通滤波、高通滤波和带通滤波等^[30]。自然界的图像一般都具有局部连续性质, 即相邻像素的数值相近^[31-33]。而噪声使得图像的灰度值在与噪声点邻近的区域内出现跳跃。因此, 滤波器的作用就是减弱或消除图像噪声点的影响。

空间域图像增强可通过特定的卷积模板对图像进行卷积操作来实现, 假设待处理的含噪声图像为 $f(x, y)$, 所使用的平滑卷积模板为 $h(m, n)$, 则空间域的图像平滑操作可表示为^[30]:

$$g(x, y) = f(x, y) \otimes h(m, n) = \sum_m \sum_n h(m, n) \cdot f(x + m, y + n), m, n \in \Omega \quad (20)$$

式中, Ω 为模板的作用区域; m 和 n 均为与模板大小有关的正整数。

频域滤波操作与空间域滤波操作相对应。在图像

频谱中,高频成分主要对应图像的细节、纹理和噪声,低频成分则与图像平滑区域的总体灰度级分布相对应^[34]。因此,图像平滑操作可通过衰减频谱中的高频成分来实现,而图像锐化操作则可通过增强频谱中的高频部分来实现。对于频率域的处理,对式(20)两边进行傅里叶变换即可^[30]:

$$G(u, v) = F(u, v) \otimes H(u, v) \quad (21)$$

式中, $G(u, v)$ 、 $F(u, v)$ 和 $H(u, v)$ 分别为噪声图像、平滑模板和处理后的图像的傅里叶变换。图 10 为空域滤波与频域滤波示意图。

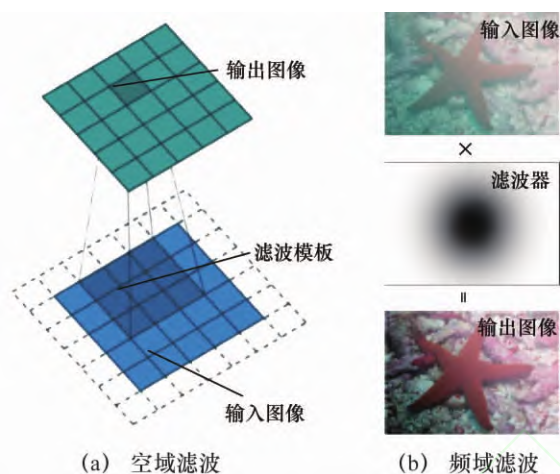


图 10 空域滤波与频域滤波示意图

同态滤波广泛用于解决水下图像雾化、亮度不均匀等问题^[35],该方法将像素灰度变换与频率过滤相结合,通过改变图像动态范围和提高对比度来改善图像质量,同态滤波的效果如图 11 所示。该算法采用与 Retinex 相似的模型,假设光照分量的变化相对比较平缓,对应于图像的低频部分,景物区域边缘细节较多,对应于图像的高频部分。算法过程中首先对图像进行对数变换以压缩其动态范围,然后进行傅里叶变换,并用滤波器增强高频分量并抑制低频分量,最后进行傅里叶逆变换从而获得增强的水下图像。基于同态滤波技术,Ghani^[36]提出基于图像融合的同态滤波水下图像纹理清晰化方法,该方法结合同态滤波和图像融合技术来处理水下图像的低质量问题。同时通过 CLAHE 来改善图像的局部对比度,以减小欠增强区域和过增强区域的影响。定量和定性结果证明,该方法在对比度和图像细节方面有较大改善,图像颜色也较为自然。针对水下图像的特点,康艳梅^[37]等人提出同态滤波和双正交小波阈值滤波图像增强算法,该算法有效地改善了水下图像的对比度和光照不均匀性。为改善水下图像的色彩,Luan^[38]等人提出了一种新的水下图像综合处理方法。首先采用同态滤波矫正水下图像的非均匀光照;其次使用 RGB 颜色空间中的对比度增

强算法以提高图像的颜色对比度;最后将图像分解至小波域抑制前两步放大的噪声。实验结果表明,该方法能够校正颜色不平衡,适用于颜色不均匀图像及非均匀光照的水下图像。

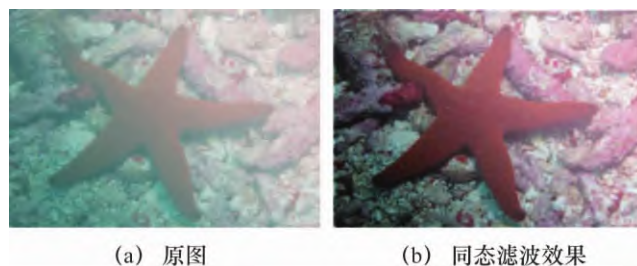


图 11 同态滤波增强效果

除同态滤波以外,小波变换是常用的一种水下图像处理方法,其在频域和时域都具有良好的局部特征表征能力^[39]。小波变换的核心是把图像信号分解成多个频带分量,利用该变换可以聚焦到图像的任意细节。每一层小波分解再将待分解图像分解成多个子带,从而分离出表示图像细节与纹理的高频分量与表示图像内容的低频分量^[40-41]。因此,通过小波分解,可以在多个尺度采用不同的处理方法来增强不同频率的分量,最后对处理后的小波分量进行重构,以输出增强的图像。基于小波变换的图像融合更符合人的视觉特性,因而可以保持原始图像中的关键信息^[42]。

候国家^[43]等人通过研究水下图像处理过程中的颜色空间选择方法,提出一种基于色调不变性的水下彩色图像增强方法,结合 HSI 和 HSV 颜色模型,采用小波域滤波和约束直方图拉伸算法分别对图像的 HSI 和 HSV 颜色空间中的 S、I 分量和 S、V 分量进行处理,既保持图像色调不变,又达到图像增强的目的。基于 YUV 颜色空间,Li^[44]等人提出基于小波变换的水下图像清晰化算法。该算法基于 YUV 颜色空间,利用小波变换对亮度分量 Y 自适应地估计散射光分量,以提高水下图像的对比度。此外,在经过小波分解后的低通子带上进行非线性亮度调整,以消除亮度不均匀的问题。最后将 Y 分量、U 分量和 V 色度分量融合得到增强的图像。Shahrizan^[45]等人提出基于增强背景滤波和小波融合的深海图像增强算法。该方法集成增强背景滤波和小波变换,达到减少水下图像蓝、绿色偏的目的。

2.1.4 基于图像融合的水下图像增强算法

该类方法的思路如图 12 所示,对单个输入图像采用多种不同的图像增强方法,获得多个增强版本的水下图像,再对每一版增强后的图像求取融合权重,最后进行图像融合获得增强后的图像。Ancuti^[46]等人提出基于融合的水下图像增强算法(Enhancing Underwater

Images by Fusion, EUIF), 该算法的增强效果如图 13 所示。图像融合过程中, 为避免单尺度融合在输出图像中产生光晕, Ancuti 提出多尺度融合技术。多尺度融合是基于 Adelson 和 Burt 提出的高斯金字塔和拉普拉斯金字塔^[47], 首先基于高斯滤波算子, 将权重图分解为高斯金字塔; 基于拉普拉斯算子, 将输入图像分解为拉普拉斯金字塔; 再对拉普拉斯金字塔和高斯金字塔在各尺度上进行融合, 最后将金字塔还原为输出图像。基于融合的水下图像增强算法应用范围较广, 可有效针对水下图像对比度低、模糊以及色彩偏差等多种缺陷。

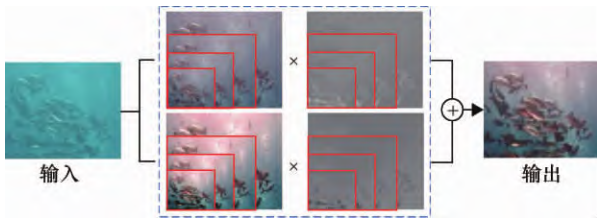


图 12 图像融合算法流程

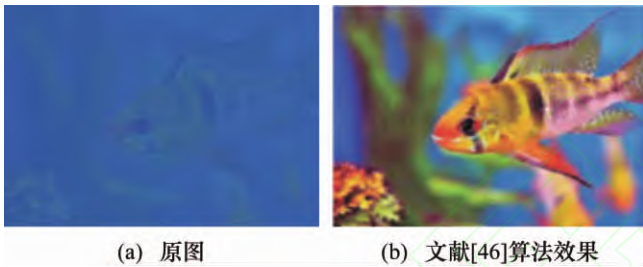


图 13 基于融合的图像增强算法效果

为进一步改善图像增强效果, Ancuti^[48] 等人相继提出多尺度融合的单图像增强算法。首先, 通过采用白平衡和对比增强算法从原始图像中得到两个增强版本的图像, 为使输出图像具有良好的可见性, Ancuti 选择 3 个权重对图像进行融合: 亮度权重、色度权重和显著性权重。最后, 通过多尺度融合算法消除图像权重引入的伪影。针对雾化的暗图像, Ancuti^[49] 等人提出基于融合的暗图像增强, 在改善图像对比度的同时有效提高图像亮度, 适用于深海暗图像的处理。2018 年, 在前期研究基础上, Ancuti^[50] 等人提出基于色彩平衡和融合策略的水下图像增强算法。在该算法中, Ancuti 创新性地提出基于绿通道的色彩补偿机制, 该补偿方法对各种色偏的图像具有极好的鲁棒性。为改进基于绿通道的色彩补偿机制, 山东大学林明星^[6] 等人提出基于亮通道的色彩补偿方法, 提高绿通道色彩补偿机制的泛化能力, 并通过多尺度融合实现水下图像增强。

基于融合的图像增强应用范围广泛, 在无任何先验信息的前提下, 能有效地从单幅图像中平衡水下图

像色彩并提高水下图像对比度。Ancuti 设计的多尺度融合策略有效地改善了简单的图像融合方法所产生的伪影。其提出的色彩补偿算法对各种色偏的图像均有较好的矫正效果。Ancuti 等人的研究工作极大地推进了水下图像处理技术的进步。以下为图像融合过程中常用的融合权重。

(1) 色彩权重^[51]。

$$W_c(x, y) = L(x, y) \{ 1 + \cos [\alpha H(x, y) + \varphi] S(x, y) \} \quad (22)$$

式中, $L(x, y)$ 为输入图像灰度图; $H(x, y)$ 为输入图像饱和度; $S(x, y)$ 为输入图像的色调; φ 和 α 为调节因子, 取 $\varphi = 250^\circ$, $\alpha = 2$ 。

(2) 饱和度权重^[46, 48]。

$$W_s(x, y) = \{ \{ [R(x, y) - L(x, y)]^2 + [G(x, y) - L(x, y)]^2 + [B(x, y) - L(x, y)]^2 \} / 3 \}^{\frac{1}{2}} \quad (23)$$

式中, $L(x, y)$ 为输入图像灰度图; $R(x, y)$, $G(x, y)$ 和 $B(x, y)$ 分别为输入图像的红、绿、蓝三通道图像。

(3) 亮度权重^[46]。

$$W_b(x, y) = \exp \left\{ - \frac{[L(x, y) - 0.5]^2}{2 \times 0.25^2} \right\} \quad (24)$$

式中, $L(x, y)$ 为输入图像灰度图。

(4) 突出物权重^[48]。

$$W_T(x, y) = \| I_\mu - I_{blur}(x, y) \|_2 \quad (25)$$

式中, $I_{blur}(x, y)$ 为高斯模糊后的输入图像; I_μ 为输入图像均值; $\| \cdot \|_2$ 为 $L2$ 范数。

2.1.5 基于 CNN 的水下图像增强算法

CNN 在图像检测、自然语言处理等领域取得了一系列突破性的成果, 其强大的分类性能及特征学习能力引起了广泛的关注^[52]。近年来, 国内外研究人员将 CNN 应用于各类图像处理, 如暗图像增强、图像去噪、水下图像增强等。

Li^[53] 等人创新性地提出水下生成对抗神经网络, 实现水下图像增强。由于真实的水下图像缺乏相应的参考图像, Li 将大气图像和深度图像输入, 生成对抗神经合成水下图像, 并将合成的水下图像、深度图像以及相应的大气图像(注: 大气图像作为参考图像)输入图像增强模型对模型进行训练, 实现水下图像增强。此外, Wang^[54] 等人提出端到端的水下图像增强模型。该模型由颜色校正子网络和去雾子网络构成, 采用人工合成的 20 万张图像对模型进行训练, 通过统一训练的方式实现水下图像颜色矫正与去模糊。由于水下环境特殊, 无法获取无水情况下的真实场景, 故在对水下图像质量进行评价以及水下增强神经网络进行训练时往往缺乏真实的参考图像。为了解决上述情况, Li^[55] 等人建立水下图像增强测试集(Underwater Image Enhancement Database, UIEB), 为水下图像处理方法性能测评以及水下神经网络模型训练提供基准集; 同时, 还

构建卷积神经网络 Water-Net, 并采用基准集 UIEB 作为训练数据对 Water-Net 进行训练, 实验结果表明, 该模型的水下图像增强性优于大部分现有水下图像处理方法。

2.2 水下图像复原

对式(7)表示的水下成像模型简化后可知, 水下成像过程可视为一个线性的过程, 相机获取的图像 $I^c(x, y)$ 视作真实图像信号 $J^c(x, y)$ 与透射率 $t^c(x, y)$ 的乘积, 再加上背景散射光 $B^c[1 - t^c(x, y)]$ 。其表达式为^[12]

$$I^c(x, y) = J^c(x, y) t^c(x, y) + B^c[1 - t^c(x, y)] \quad (26)$$

图像复原的目的是根据先验统计规律, 通过神经网络或者特殊设计的硬件估计出 $t^c(x, y)$ 和 B^c , 从而还原真实场景 $J^c(x, y)$ 。水下图像复原技术分为三类: 基于多图像及特殊硬件的图像复原、基于先验信息的图像复原、基于 CNN 的图像复原。

2.2.1 基于多图像及特殊硬件的水下图像复原算法

随着水下图像处理技术的发展, 光的偏振现象也被应用于水下图像的处理。Namer^[56]等人基于独立成分分析, 从偏振图像中估计出背景光的偏振度和强度 B^c , 进而估计出景物的深度图 $t^c(x, y)$, 从而实现雾化图像的复原。Schechner^[57]等人的研究成果表明, 水下图像退化效果与光的偏振相关, 而场景有效辐射则与光偏振无关。因此, 在相机镜头上安装可调偏振器, 获取同一场景不同偏振角的多幅图像, 并结合这些图像以及从这些图像中计算出的偏振度, 即可复原出有效场景辐射。基于对自然光照下水下成像过程的研究, Treibitz^[58-59]等人进一步提出基于主动偏振的水下图像处理技术。首先, 在相机或光源上安装偏振器, 通过调整偏振器角度, 拍摄多幅同一场景的水下图像; 再从这些不同偏振角度的图像中估计出背景光的偏振度; 最后, 结合水下成像模型, 则可对水下图像进行复原。该方法操作简单, 但仅适用于水下固定目标的图像。此外, Treibitz^[60]等人通过分析单点光源与多点光源对环境的对比度的影响, 并在多方向人工照明光的条件下捕获同一场景的多帧图像, 然后通过后处理方式将多帧图像融合为单个清晰图像。

2.2.2 基于先验信息的水下图像复原算法

基于先验信息的图像复原算法中, 最著名的算法是何凯明^[61]等人提出的暗通道先验(Dark Channel Prior, DCP)算法。暗通道先验是户外清晰图像的一种统计规律。该先验是基于对大量户外清晰图像的统计规律, 即清晰的户外图像的大部分像素点在其邻域内至少一个颜色通道具有极低的亮度, 可将其近似为零。受暗通道先验启发, 众多学者通过改进 DCP 算法对水下图像进行复原。Chiang^[62]等人将 DCP 用于水下图

像复原, 提出基于波长补偿和去模糊的水下图像复原算法。该方法首次同时考虑光散射、颜色失真及可能存在的人工照明的影响。算法通过比较前景和背景光的强度, 以确定在图像拍摄过程中是否采用人工光源。在补偿人工光源的影响后, 根据透射图补偿光从场景到相机之间的衰减所引起的色差。此外, 根据背景光中存在的不同颜色通道的剩余能量比来估计图像场景所处的水深, 并进行相应的补偿, 最终达到恢复图像色彩的目的。Dreus 分析了水下成像特性——水介质对红光的吸收率较大, 故红通道亮度较低, 接近暗通道, 若采用暗通道先验规律, 则无法准确估计场景深度。基于水下图像的这一特性, Dreus^[63]等人改进了 DCP 算法, 提出水下暗通道先验(Underwater Dark Channel Prior, UDCP)算法。该算法仅对衰减量较少的绿色和蓝色通道使用暗通道先验, 从而准确地估计场景深度, 实现水下图像恢复。考虑到不同波长的光具有不同的衰减率, Galdran^[64]等人提出红通道水下图像复原(Red-Channel Underwater Image Restoration, RUIR)算法, RUIR 是 UDCP 的改进版本。该算法将红通道取反后与绿色通道、蓝色通道组成新图像作为输入, 通过暗通道先验求透射率图。为防止原图像中存在人工光源造成恢复后的图像局部过亮, Galdran 在求透射率图的过程中创新性地加入饱和度通道。实验结果表明, RUIR 可有效地恢复短波长相关的颜色, 且对存在人工光源的水下图像也有较好的鲁棒性。基于水下成像模型, 天津大学 Li^[65]等人构建最小信息丢失原则来估计透射图, 从而初步复原水下图像, 然后再通过直方图先验对恢复后的图像进行对比度增强。此外, 李黎^[66]等人采用改进的暗通道先验算法去除水下图像后向散射光, 再通过白平衡算法矫正图像色偏。Peng^[67]等人提出一种基于光吸收和图像模糊的场景深度估计新算法, 可应用于水下成像模型以恢复水下图像。Serikawa 和陆慧敏^[68]通过研究新的水下成像模型, 对传播路径上的颜色衰减按比例进行补偿, 并提出联合三边滤波去雾算法提高水下图像对比度。

除暗通道先验外, 基于其他先验信息的图像恢复算法也被用于水下图像的恢复。Bianco^[69]等人提出一种新的先验方法, 该先验算法可以利用每个颜色通道的衰减量之差来计算透射率图。Wang^[33]等人提出自适应衰减先验算法(Adaptive Attenuation-Curve Prior, AACP), 通过对水下图像聚类, 获取水下颜色衰减曲线, 并对曲线取对数, 从而估计出透射图。山东大学林明星^[70]等人提出衰减颜色曲线分解算法(Decomposing Curves of Attenuating Prior, DCAP), 将水下颜色曲线分解到红、绿、蓝三颜色通道, 获取初始透射图, 并通过加权平均的方式对初始透射图进行修复, 最后进行

保边滤波,从而准确估计出透射图。

2.2.3 基于 CNN 的水下图像复原算法

基于 CNN 的水下图像复原方法与基于先验信息的水下图像复原方法相似,该类方法通过构建 CNN,并对其进行训练,从而由单张水下图像输出透射图及背景光,并将透射图与背景光输入水下成像模型以还原出清晰的水下图像。Shin^[71]等人提出一个通用卷积结构,从该网络中可同时学习水下图像的透射图及背景光,实现水下图像复原。为了进一步提高复原效果,Hu^[72]等人提出平行卷积神经网络对水下图像进行处理,该网络包含两个平行的分支,分别对透射图及背景光进行估计,最后将背景光及透射图输入水下成像模型实现水下图像复原。Hou^[73]等人通过构建联合残差网络从输入图像中学习透射图,并取透射图中最亮的 0.1% 像素为背景光,再将透射图和背景光输入水下成像模型获取去雾后的图像,最后对去雾的图像进行色彩矫正,以获取复原的水下图像。此外,Cao^[74]等人构建深度卷积神经网络直接从输入图像中学习背景光和透射图,实现水下图像复原。考虑到水下图像缺乏参考图像的情况,Barbosa^[75]等人提出一种基于 CNN 的图像复原方法,该方法不需要真实数据,仅使用一组图像质量度量来指导恢复学习过程。近年来,针对低光照、浑浊的水下图像,Lu^[76]等人提出深度卷积神经网络对图像深度进行估计,实现水下图像复原,最后采用基于光谱特征的颜色校正方法对水下图像的颜色进行还原。然而,该方法仅在实验室模拟水下环境,对真实水下图像处理效果有待进一步验证。

3 水下图像评价指标及结果展示

3.1 水下图像评价指标

为了对水下图像处理方法的性能进行评价,需要建立水下图像质量评价标准。根据评测过程中是否有主观个体的参与,水下图像质量评价方法可以分为主观评测方法和客观评测方法。因不同主观个体对图像亮度、色调、对比度等敏感程度不同,故在主观测评中,不同个体对同一图像的评价具有差异。因此,为了消除不同主观个体对图像评分的影响,主观评测方法需组织大量的评测人员对水下图像进行评价,并计算得出所有评测人员的平均分。由于人通常是图像的最终受体,故主观评测方法比较接近真实^[4],但该方法需要耗费大量的时间及人力资源成本,且无法实现在线实时评测。

为弥补主观评价方法的不足,研究人员致力于发展客观评测方法。按照评测过程中是否有参考图像,客观评测可以分为全参考评测和无参考评测。全参考评测主要包括:峰值信噪比(Peak Value Signal to Noise

Ratio,PSNR)、均方误差(Mean Square Error,MSE)、结构相似性(Structural Similarity Metric,SSIM)^[77]等。常用的无参考评测有:边缘锐度、特征点匹配、基于人类视觉系统的水下图像质量评价度量(Underwater Image Quality Measures,UIQM)^[78]、水下彩色图像质量评价度量(Underwater Color Image Quality Evaluation Metric,UCIQE)^[79]等。由于水下环境的特殊性,拍摄的水下图像必然存在失真,无法获得相应的参考图像,故水下图像质量评测方法多为无参考评测。

水体性质决定了水下图像的失真类型,由于水下图像失真类型较多,失真程度各不相同,上述客观评测方法评价处理后的水下图像仍存在一定缺陷,如边缘锐度仅计算水下图像中物体边缘的平均锐化程度作为图像质量分数,忽视了颜色的重要性。而 UIQM 及 UCIQE 忽视了图像噪声及局部区域过亮对图像质量的影响,图像噪声及局部过亮也可导致较高的质量评分。因此,水下图像客观评价方法仍有较大的改进空间。

3.2 结果展示

为了验证各类算法的性能,下面对部分算法进行实验验证。虽然众多研究学者提出采用 UIQM、UCIQE、特征点匹配、锐化程度等客观评价指标对处理后的水下图像进行质量评价,但目前暂无公认的水下客观评价指标,故本节仅展示视觉对比结果以及算法运行时间。参与实验的算法包括:CLAHE^[17]、MSRCR^[23]、TVIE^[28]、DPIE^[29]、AACP^[33]、EUIF^[46]、UD-CP^[63]、RUIR^[64]、DCAP^[70](其中UDCP和RUIR为笔者自编代码,其余均为开源代码)。实验图像来源于部分文献及互联网,实验平台为 Matlab2018a,计算机 CPU 为 Intel Core i5-6500 3.19 GHz。相应的处理结果如图 14 所示,各算法运行时间如表 1 所示(注意:图片尺寸为 500 像素×400 像素)。根据实验结果,下一节将对各类算法的优缺点进行归纳与总结。

表 1 算法运行时间

方法	运行时间/s	方法	运行时间/s
MSRCR	0.32	UDCP	9.17
CLAHE	0.17	RUIR	0.32
EUIF	0.41	AACP	9.59
TVIE	0.99	DCAP	0.53
DPIE	0.88		

4 总结

4.1 水下图像增强方法总结

水下图像增强技术的发展已有多年的历史,随着水下探测器的出现,国内外学者开始专注于水下图像

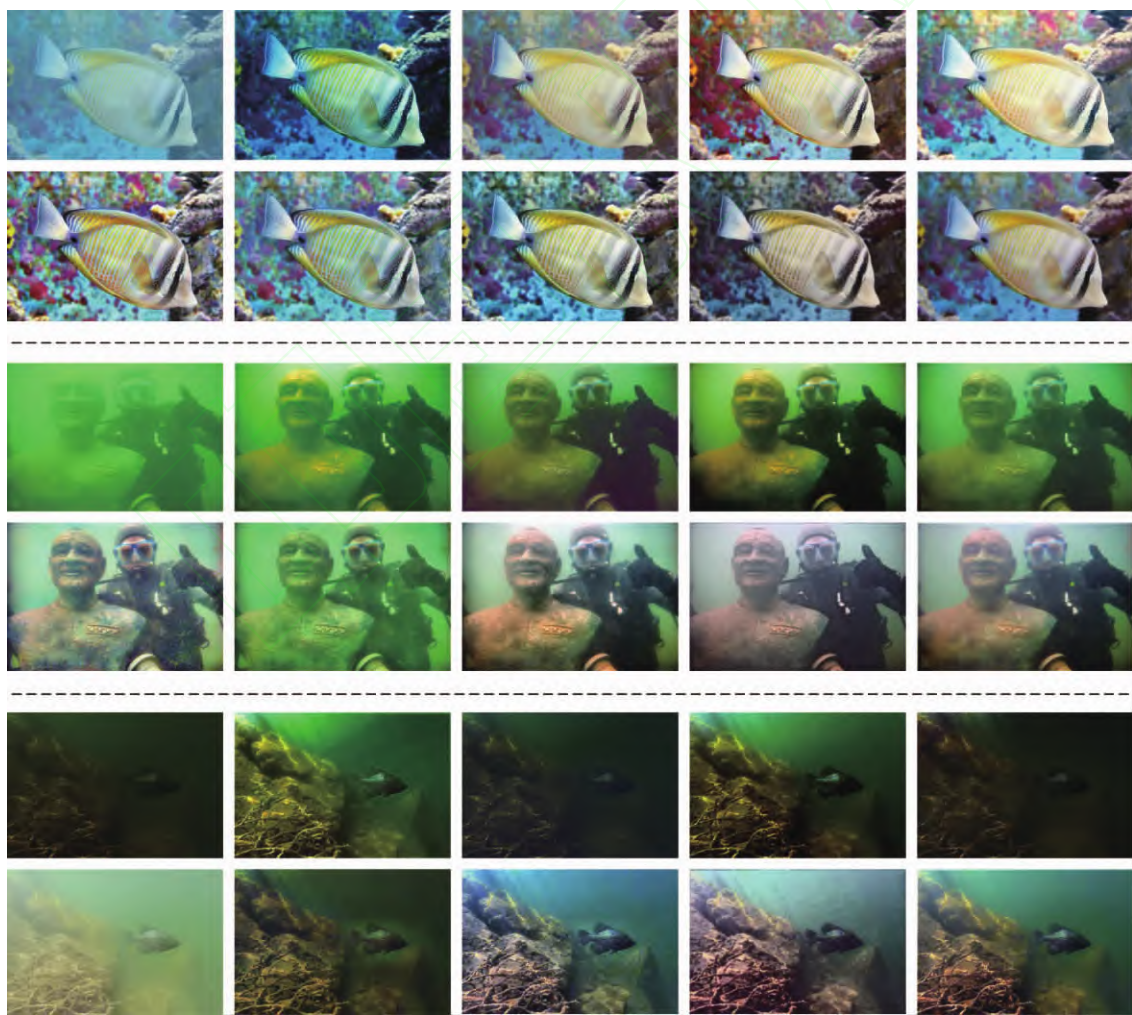
算法的研究,针对于水下图像存在模糊、低对比度、光照不均匀和噪声等特点,提出了诸多适用于水下图像的增强方法,且取得了一定成果。目前,水下图像增强算法众多,按照处理思路可将图像增强算法分为五类:基于直方图的水下图像增强、基于 Retinex 的水下图像增强、基于滤波和信号处理的水下图像增强、基于图像融合的水下图像增强和基于 CNN 的水下图像增强。各类图像增强算法适用于不同的水下图像,其增强的效果也随图像的变化而不同。如图 14 所示,水下图像增强方法能有效改善水下图像对比度,提升水下图像质量。相比水下图像复原方法,水下图像增强方法对图像整体色彩偏差严重以及水下暗图像有较好的效果,而对水下雾化程度较轻的图像效果欠佳。此外,对水下图像增强方法中各类算法的优缺点总结如下。

① 基于直方图的水下图像增强算法的基础是对图像直方图进行处理(如:直方图局部或整体动态范围拉伸)。该类算法计算简单,效率高(表 1 中 CLA-

HE),对单通道的灰度图像有较好的效果。但水下彩色图像皆为 3 个通道,该类算法在处理过程中对每一个通道的直方图进行拉伸,再将拉伸后的 3 个通道进行组合,拉伸过程中未考虑 3 个通道最初的色彩比例,故造成增强后的图像出现颜色失真。

② 基于 Retinex 的水下图像增强算法在图像处理过程中将图像分解为反射率和非均匀光照的乘积。图像增强的目的是移除非均匀光照,从而获得真实图像。目前,该类算法中效果较为出色的算法是 TVIE 和 DPIE,这两种算法有效地改善了 MSRCR 在图像引起的光晕现象。虽然 TVIE 和 DPIE 具有较好的增强效果,但是需要人为调节的参数过多,且同一组参数仅对特定场景有效,故难以实现水下图像实时处理。

③ 基于滤波和信号处理的水下图像增强算法主要是通过滤波器对图像进行去噪,该类算法虽然能有效去除水下图像中的噪声污染,但对图像的增强效果不明显,且难以改善水下图像的色彩失真现象。



注: 每组图从左到右,从上到下依次为: 原图、UDCP^[63]、RUIR^[64]、AACP^[33]、DCAP^[70]、MSRCR^[23]、CLAHE^[17]、EUIF^[46]、TVIE^[28]、DPIE^[29] (奇数行: 水下图像复原方法; 偶数行: 水下图像增强方法)

图 14 各类算法处理结果

④ 基于融合的水下图像增强算法是 Ancuti 等人提出的一类新的图像处理算法。该算法是将多个增强算法处理后的图像进行融合从而实现水下图像增强。因此,该类算法应用范围较为广泛,对大多数水下图像均有较好的增强效果,但该类算法计算较为复杂,且对背景区域增强效果不明显。

⑤ 基于 CNN 的水下图像增强算法是现存水下图像增强方法中性能优异的一类处理方法。然而,由于模型训练过程中参考图像缺乏,使得该类处理方法目前仍处于研究起步阶段,故该类方法有较大的提升空间。

除此以外,上述 5 类算法具有一个共同的缺陷,即它们同属于水下图像增强算法,在图像处理过程中不考虑水下光学成像模型,虽然对水下图像的模糊效应有较好的增强效果,但对水下图像的色彩失真效应无法按衰减量进行补偿,故上述算法处理后的图像中会存在一定程度的色彩失真。如图 14 所示,MSRCR、CLAH、EUIF、TVIE、DPIE 等水下图像增强方法在近景区域色彩得到有效补偿,而在远景区域色彩仍存在一定偏差。

4.2 水下图像复原方法总结

水下图像复原方法是水下图像处理技术中的重要组成部分,其目的是将相机获取的水下图像按退化模型恢复到退化前的真实图像。水下图像复原技术分为水下单图像复原(包括基于先验信息的水下图像复原和基于 CNN 的水下图像复原)和基于多图像及复杂硬件的水下图像复原。基于多图像及复杂硬件的水下图像复原技术采用同一场景下的多帧偏振图像及多光源等对成像模型中的各种参数进行估计(如:场景深度、背景光等),从而实现水下图像的复原。该类方法可获得较好的水下图像复原效果,但水下机器人难以稳定地获取同一场景下的多帧图像,且水下机器人上无法安装多个不同角度的人工光源,故该类方法不适用于水下机器人及水下视频图像处理。

水下单图像复原技术仅使用单张图像作为输入,通过各种先验信息和 CNN 对场景深度及背景光进行估计,从而实现水下图像的复原。自暗通道先验算法提出后,受其启发,涌现出大量基于暗通道先验的变种算法,但都未能有效地解决水下图像模糊、低对比度、光照不均匀和噪声等缺陷。此外,大部分水下图像复原算法以暗通道先验方法为基础,故在复原色偏严重的水下图像以及水下暗图像时,无法准确估计透射图,导致水下单图像复原算法对该类图像失效,如图 14 所示。同时,现存的基于先验信息的图像复原技术中,对深度图进行保边平滑这一操作耗费较多时间,仍有待改进。而基于 CNN 的水下图像复原,因 CNN 训练过

程中缺乏相应的背景光及深度参考图像,故由 CNN 估计的透射图及背景光准确度不高,图像复原效果有待提高。综上所述,单图像复原技术中存在大量研究空间,如:建立大规模水下图像训练集,以便对 CNN 进行训练;研究适用于水下场景的其他先验算法,从而更加准确地估计场景深度;研究执行效率更高的保边平滑算法,提升图像复原速度,实现实时图像复原处理;以及如何结合其他图像增强算法进一步提升图像质量,为下一步目标识别提供清晰的水下图像。

5 展望

水下图像处理技术在提升水下目标识别准确率方面具有一定的促进作用。近年来,大量学者开始关注水下图像处理技术^[80]。虽然水下图像处理技术已经取得了巨大的进展,但由于水下环境的特殊性,水下成像过程中存在光衰减、色彩偏差以及背景噪声等众多不确定因素,各类水下图像处理方法的性能仍有待提高。这也为水下图像处理技术的发展指明了方向。

(1) 提高适应性、鲁棒性和实时性。虽然水下单图像处理技术已经取得了巨大的进展,但由于水下环境复杂,现存的大部分水下图像处理技术仅对某一类水下图像有效,故水下图像处理技术的适应性和鲁棒性仍有待提高。此外,水下机器人对水下图像处理技术的实时性提出了较高的要求,而大部分水下图像处理算法复杂性较高,仍有待改进。

(2) 建立水下图像训练集与测试集。近年,CNN 在低照度图像增强、雾图像处理、图像去噪方面取得了令人瞩目的成绩。然而,因水下图像缺乏相应的参考图像,极大地限制了 CNN 在水下图像处理方面的应用。水下图像处理领域迫切需与水下图像对应的参考图像,一方面可用于训练 CNN,另一方面可用于评价水下图像处理技术的性能。

(3) 提出水下图像质量评价指标。目前,大部分研究人员仅通过主观评价、UIQM、UICQE 等指标评价水下图像处理技术的性能。尽管 UCIQE 和 UIQM 应用较为广泛,但这两项指标是以人类视觉系统特性为出发点,评分更倾向于过度增强的彩色图像,难以对水下图像质量进行正确评价^[80]。因此,研究一种泛化性能好、抗干扰能力强的客观评价指标对水下图像处理技术的进一步发展意义重大。

(4) 建立增强、识别一体化的模型。水下图像处理的目的是提高水下目标识别准确率。因此,将水下图像处理技术与水下目标识别方法结合,建立面向水下机器人的集成图像增强、目标识别一体化的模型,以提升水下目标识别准确率,在实用性方面更有意义。

参考文献:

- [1] 顾亚军,周悦,郭威. 全海深 ARV 水下 LED 调光驱动电路设计[J]. 测控技术,2018,37(5):97-100.
- [2] 李雪,杨大勇,刘家毅,等. 水下石油管道巡查机器人控制系统的设计[J]. 测控技术,2019,38(8):15-20.
- [3] 侯国家. 水下图像增强与目标识别算法研究[D]. 青岛:中国海洋大学,2015.
- [4] 林喜洲. 水下光学图像失真度评测及图像增强研究[D]. 厦门:厦门大学,2016.
- [5] WANG N,ZHENG H Y,ZHENG B. Underwater image restoration via maximum attenuation identification[J]. IEEE Access,2017,5:18941-18952.
- [6] 代成刚,林明星,王震,等. 基于亮通道色彩补偿与融合的水下图像增强算法[J]. 光学学报,2018,38(11):111003.
- [7] 谢小敏. 水下图像分割和典型目标特征提取及识别技术研究[D]. 南京:南京理工大学,2015.
- [8] LU H M,LI Y J,ZHANG Y D,et al. Underwater optical image processing: a comprehensive review[J]. Mobile Networks and Applications,2017:1-8. doi: 10.1007/s11036-017-0863-4.
- [9] 赵欣慰. 水下成像与图像增强及相关应用研究[D]. 杭州:浙江大学,2015.
- [10] GUO Q W,XUE L L,TANG R C,et al. Underwater image enhancement based on the dark channel prior and attenuation compensation[J]. Journal of Ocean University of China,2017,16(5):757-765.
- [11] JAFFE J S. Computer modeling and the design of optimal underwater imaging systems[J]. Journal of Oceanic Engineering,1990,15(2):101-111.
- [12] 徐岩,曾祥波. 基于红色暗通道先验和逆滤波的水下图像复原[J]. 激光与光电子学进展,2018,55(2):215-222.
- [13] 王蕊. 单幅雾天及水下图像的复原方法研究[D]. 青岛:中国海洋大学,2014.
- [14] WANG R Q,WANG Y F,ZHANG J,et al. Review on underwater image restoration and enhancement algorithms[C]//Proceedings of the 7th International Conference on Internet Multimedia Computing and Service. 2015:1-6. doi: 10.1145/2808492.2808548.
- [15] 张懿,刘旭,李海峰. 自适应图像直方图均衡算法[J]. 浙江大学学报(工学版),2007,41(4):630-633.
- [16] PIZER S M,AMBURN E P,AUSTIN J D,et al. Adaptive histogram equalization and its variations[J]. Computer Vision Graphics & Image Processing,1987,39(3):355-368.
- [17] ZUIDERVELD K. Contrast limited adaptive histogram equalization[M]//Graphics Gems IV. Academic Press Professional, Inc.,1994:474-485.
- [18] HITAM M S,AWALLUDIN E A,WAN Y,et al. Mixture contrast limited adaptive histogram equalization for underwater image enhancement[C]//Proceedings of International Conference on Computer Applications Technology. IEEE,2013:1-5.
- [19] SINGH K,KAPOOR R,SINHA S K. Enhancement of low exposure images via recursive histogram equalization algorithms[J]. OPTIK-International Journal for Light and Electron Optics,2015,126(20):2619-2625.
- [20] GHANI A S A,ISA N A M. Enhancement of low quality underwater image through integrated global and local contrast correction[J]. Applied Soft Computing,2015,37:332-344.
- [21] LAND E H,MCCANN J. Lightness and retinex theory[J]. Journal of the Optical Society of America,1971,61(1):1-11.
- [22] JOBSON D J,RAHMAN Z,WOODELL G A. Properties and performance of a center/surround retinex[J]. IEEE Transactions on Image Processing,1997,6(3):451-462.
- [23] JOBSON D J,RAHMAN Z,WOODELL G A. A multiscale retinex for bridging the gap between color images and the human observation of scenes[J]. IEEE Transactions on Image Processing,1997,6(7):965-976.
- [24] FUNT B,CIUREA F,MCCANN J. Retinex in MATLABTM[J]. Journal of Electronic Imaging,2004,13(1):112-121.
- [25] ZHOU Y,LI Q,HUO G Y. Human visual system based automatic underwater image enhancement in NSCT domain[J]. KSII Transactions on Internet and Information Systems,2016,10(2):837-856.
- [26] ZHANG S,WANG T,DONG J Y,et al. Underwater image enhancement via extended multi-scale retinex[J]. Neurocomputing,2017,245:1-9. doi: org/10.1016/j.neucom.2017.03.029.
- [27] MERCADO M A,ISHII K,AHN J. Deep-sea image enhancement using multi-scale retinex with reverse color loss for autonomous underwater vehicles[C]//Proceedings of IEEE Conference on Oceans. 2017.
- [28] FU X Y,ZHUANG P X,HUANG Y,et al. A retinex-based enhancing approach for single underwater image[C]//Proceedings of IEEE International Conference on Image Processing. 2014:4572-4576.
- [29] DAI C G,LIN M X,WANG J K,et al. Dual-purpose method for underwater and low-light image enhancement via image layer separation[J]. IEEE Access,2019:178685-178698. doi: 10.1109/ACCESS.2019.2958078.
- [30] GONZALEZ R,WOODS R,EDDINS S. Digital Image Processing Using MATLAB[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry,2016:43-78.
- [31] FATTAL R. Dehazing using color-lines[J]. ACM Transactions on Graphics,2014,34(1):1-14.
- [32] WANG Y,LIU H,CHAU L P. Single underwater image restoration using attenuation-curve prior[C]//Proceedings of

- IEEE International Symposium on Circuits and Systems. 2017: 1 – 4. doi: 10.1109/ISCAS.2017.8050994.
- [33] WANG Y, LIU H, CHAU L P. Single underwater image restoration using adaptive attenuation-curve prior [J]. IEEE Transactions on Circuits & Systems-I: Regular Papers, 2018, 65(3): 992 – 1002.
- [34] GHANI A S A, ISA N A M. Homomorphic filtering with image fusion for enhancement of details and homogeneous contrast of underwater image [C] // Proceedings of 8th National Technical Seminar on Underwater System Technology. 2015.
- [35] GARCIA R, NICOSEVICI T, CUFI X. On the way to solve lighting problems in underwater imaging [C] // Proceedings of MTS/IEEE Oceans Conference. 2000: 1018 – 1024.
- [36] GHANI A S A. Image contrast enhancement using an integration of recursive-overlapped contrast limited adaptive histogram specification and dual-image wavelet fusion for the high visibility of deep underwater image [J]. Ocean Engineering, 2018, 162(15): 224 – 238.
- [37] KANG Y M, CHEN M S, HE Z Y. Underwater image enhancement algorithms based on LED auxiliary lighting [J]. Video Application & Project, 2013, 37(15): 211 – 214.
- [38] LUAN X, HOU G J, SUN Z Y, et al. Underwater color image enhancement using combining schemes [J]. Marine Technology Society Journal, 2014, 48(3): 57 – 62.
- [39] 黄仁, 梁笑. 基于多尺度子带划分的雾霾天气图像增强方法 [J]. 计算机应用, 2014(S1): 215 – 218.
- [40] 毛士艺, 赵巍. 多传感器图像融合技术综述 [J]. 北京航空航天大学学报, 2002, 28(5): 512 – 518.
- [41] 刘贵喜, 杨万海. 基于小波分解的图像融合方法及性能评价 [J]. 自动化学报, 2002, 28(6): 927 – 934.
- [42] 祝培, 朱虹, 钱学明, 等. 一种有雾天气图像景物影像的清晰化方法 [J]. 中国图象图形学报, 2004, 9(1): 124 – 128.
- [43] HOU G J, LUAN X, SONG D L. A study on color model selection for underwater color image preprocessing [C] // Proceedings of IEEE International Conference on Cyber Technology in Automation, Control, and Intelligent Systems. 2015: 1456 – 1461.
- [44] LI Q Z, LI C S, WANG Z Q. Restoration algorithm for degraded underwater image based on wavelet transform [J]. Computer Engineering, 2011, 37(22): 202 – 203.
- [45] SHAHRIZAN A, GHANI A, FAKHRI A, et al. Integration of enhanced background filtering and wavelet fusion for high visibility and detection rate of deep sea underwater image of underwater vehicle [C] // Proceedings of International Conference on Information and Communication Technology. 2017.
- [46] ANCUTI C, ANCUTI C O, HABER T, et al. Enhancing underwater images and videos by fusion [C] // Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. 2012: 81 – 88.
- [47] BURT P, ADELSON E. The laplacian pyramid as a compact image code [J]. IEEE Transactions on Communications, 1983, 31(4): 532 – 540.
- [48] ANCUTI C O, ANCUTI C. Single image dehazing by multi-scale fusion [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2013, 22(8): 3271 – 3282.
- [49] ANCUTI C, ANCUTI C O, DE VLEESCHOUWER C, et al. Night-time dehazing by fusion [C] // Proceedings of IEEE International Conference on Image Processing. 2016: 2256 – 2260.
- [50] ANCUTI C O, ANCUTI C, DE VLEESCHOUWER C, et al. Color balance and fusion for underwater image enhancement [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2018, 27(1): 379 – 393.
- [51] ANCUTI C O, ANCUTI C, BEKAERT P. Enhancing by saliency-guided decolorization [C] // Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. 2011: 257 – 264.
- [52] 李彦冬, 郝宗波, 雷航. 卷积神经网络研究综述 [J]. 计算机学报, 2016, 36(9): 2508 – 2515.
- [53] LI J, SKINNER K A, EUSTICE R M, et al. WaterGAN: unsupervised generative network to enable real-time color correction of monocular underwater images [J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2018, 3(1): 387 – 394.
- [54] WANG Y, ZHANG J, CAO Y, et al. A deep CNN method for underwater image enhancement [C] // Proceedings of IEEE International Conference on Image Processing. 2017: 1382 – 1386.
- [55] LI C Y, GUO C L, REN W Q, et al. An underwater image enhancement benchmark dataset and beyond [J/OL]. 2019-1-11. <https://arxiv.org/abs/1901.05495>.
- [56] NAMER E, SHWARTZ S, SCHECHNER Y Y. Skyless polarimetric calibration and visibility enhancement [J]. Optics Express, 2009, 17(2): 472 – 493.
- [57] SCHECHNER Y Y, KARPEL N. Recovery of underwater visibility and structure by polarization analysis [J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2006, 30(3): 570 – 587.
- [58] TREIBITZ T, SCHECHNER Y Y. Instant 3Descatter [C] // Proceedings of IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. 2006: 1861 – 1868.
- [59] TREIBITZ T, SCHECHNER Y Y. Active polarization descattering [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence, 2009, 31(3): 385 – 399.
- [60] TREIBITZ T, SCHECHNER Y Y. Turbid scene enhancement using multi-directional illumination fusion [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2012, 21(11): 4662 – 4667.
- [61] HE K M, SUN J, TANG X O. Single image haze removal using dark channel prior [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence, 2011, 33(12): 2341 –

- 2353.
- [62] CHIANG J Y, CHEN Y C. Underwater image enhancement by wavelength compensation and dehazing [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2012, 21(4) : 1756 – 1769.
- [63] DREWS P, NASCIMENTO E D, MORAES F, et al. Transmission estimation in underwater single images [C] // Proceedings of IEEE International Conference on Computer Vision Workshops. 2013: 825 – 830.
- [64] 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.
- [65] LI C Y, GUO J C, CONG R M, et al. Underwater image enhancement by dehazing with minimum information loss and histogram distribution prior [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2016, 25(12) : 5664 – 5677.
- [66] 李黎, 王惠刚, 刘星. 基于改进暗原色先验和颜色校正的水下图像增强 [J]. 光学学报, 2017(12) : 168 – 176.
- [67] PENG Y T, COSMAN P C. Underwater image restoration based on image blurriness and light absorption [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2017, 26(4) : 1579 – 1594.
- [68] SERIKAWA S, LU H M. Underwater image dehazing using joint trilateral filter [J]. Computers & Electrical Engineering, 2014, 40(1) : 41 – 50.
- [69] CARLEVARIS-BIANCO N, MOHAN A, EUSTICE R M. Initial results in underwater single image dehazing [C] // Proceedings of Oceans MTS/IEEE Seattle. 2010: 1 – 8.
- [70] DAI C G, LIN M X, WU X J, et al. Single underwater image restoration by decomposing curves of attenuating color [J]. Optics and Laser Technology. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2019.105947>.
- [71] SHIN Y S, CHO Y, PANDEY G, et al. Estimation of ambient light and transmission map with common convolutional architecture [C] // Proceedings of Oceans MTS/IEEE Monterey. 2016.
- [72] WANG KY, HU Y, CHEN J, et al. Underwater image restoration based on a parallel convolutional neural network [J]. Remote Sensing, 2019, 11(13) : 1591.
- [73] HOU M J, LIU R S, FAN X, et al. Joint residual learning for underwater image Enhancement [C] // Proceeding of IEEE International Conference on Image Processing. 2018: 4043 – 4047.
- [74] CAO K M, PENG Y T, COSMAN P C. Underwater image restoration using deep networks to estimate background light and scene depth [C] // Proceedings of IEEE Southwest Symposium on Image Analysis and Interpretation. 2018: 1 – 4.
- [75] BARBOSA W V, AMARAL H G B, ROCHA T L, et al. Visual-quality-driven learning for underwater vision enhancement [C] // Proceedings of IEEE International Conference on Image Processing. 2018: 3933 – 3937.
- [76] LU H M, LI Y J, 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.
- [77] WANG Z, BOVIK A C, SHEIKH H R, et al. Image quality assessment: from error visibility to structural similarity [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2004, 13(4) : 600 – 612.
- [78] MIAO Y, ARCOT S. An underwater color image quality evaluation metric [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2015, 24(12) : 6062 – 6071.
- [79] PANETTA K, GAO C, AGAIAN S. Human-visual-system-inspired underwater image quality measures [J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2016, 41(3) : 541 – 551.
- [80] WANG Y, SONG W, FORTINO G, et al. An experimental-based review of image enhancement and image restoration methods for underwater imaging [J]. IEEE Access, 2019, 7: 140233 – 140251.

□