



基于人类视觉系统的水下图像质量评价方法

赵 馨,侯国家,潘振宽,李景明,王国栋

(青岛大学 计算机科学技术学院,山东 青岛 266071)

摘 要: 目前水下图像质量评价方法虽然准确性较高,但与人类主观评价相关性较低,难以实现高质量的评价。针对该问题,提出一种基于人类视觉系统进行水下图像质量评价的 UIQA 方法。将基于 CIELab 表色系的色彩饱和度、基于暗通道理论的亮度对比度和图像清晰度 3 个测量分量进行线性组合,来评价不同场景的水下图像质量,并将评价结果与采用 UIQM 方法和 UCIQE 方法得到的结果进行对比。实验结果表明,与 UIQM 方法和 UCIQE 方法相比,采用 UIQA 方法得到的水下图像质量评价结果与主观评价结果具有高度一致性,与人类主观评价相关性更高。

关键词: 水下图像质量;色彩饱和度;亮度对比度;清晰度;人类主观评价

开放科学(资源服务)标志码(OSID):



中文引用格式: 赵馨,侯国家,潘振宽,等. 基于人类视觉系统的水下图像质量评价方法[J]. 计算机工程,2020,46(7):235-242.

英文引用格式: ZHAO Xin, HOU Guojia, PAN Zhenkuan, et al. Underwater image quality assessment method based on human vision system[J]. Computer Engineering, 2020, 46(7):235-242.

Underwater Image Quality Assessment Method Based on Human Vision System

ZHAO Xin, HOU Guojia, PAN Zhenkuan, LI Jingming, WANG Guodong

(College of Computer Science and Technology, Qingdao University, Qingdao, Shandong 266071, China)

【Abstract】 Despite the high accuracy of existing underwater image quality assessment methods, they have weak correlation with subjective assessment of human beings, so it is difficult to achieve high-quality evaluation. To address the problem, this paper proposes an Underwater Image Quality Assessment (UIQA) method based on the human vision system. The method makes linear combinations of color saturation based on CIELab surface color system, brightness contrast based on dark channel theory, and image sharpness, so as to evaluate the underwater image quality in different scenes. The evaluation results are compared with those obtained by the UIQM method and UCIQE method. Experimental results show that compared with the quality assessment results of underwater images obtained by UIQM method and UCIQE method, those obtained by the UIQA method are highly consistent with the subjective evaluation results and have higher correlation with subjective evaluation of human beings.

【Key words】 underwater image quality; color saturation; brightness contrast; sharpness; subjective assessment of human beings

DOI: 10.19678/j.issn.1000-3428.0055324

0 概述

由于海洋、河流和湖泊等水下资源丰富,水下图像处理技术引起研究人员的广泛关注,并成为重要的研究课题。高质量的水下图像对于该技术的研究至关重要,因而建立有效、客观的水下图像质量评价

(Image Quality Assessment, IQA) 对于高质量水下图像的应用具有重大意义。

水下图像质量评价包括主观评价和客观评价^[1-3]。主观评价是测试人员通过对目标图像进行观察做出的评价。一般采用平均主观得分(Mean Opinion Score, MOS)或平均主观得分差异(Differential Mean Opinion

基金项目: 国家自然科学基金(61901240);中国国家留学基金(201908370002);中国博士后科学基金面上项目(2017M612204);山东省自然科学基金(ZR2019BF042, ZR2019MF050)。

作者简介: 赵馨(1993—),女,硕士研究生,主研方向为图像处理;侯国家(通信作者),讲师、博士;潘振宽,教授、博士;李景明,硕士研究生;王国栋,副教授、博士。

收稿日期: 2019-06-28 **修回日期:** 2019-08-19 **E-mail:** hgjouc@126.com

Score, DMOS), 即人眼对无失真图像和有失真图像评价得分的差异^[4]来进行主观评价。但是在实际应用中, 主观评价常受到测试人员的知识水平、观测时间、所处位置的光照等诸多因素限制, 需要测试人员进行多次重复实验来提高评价的准确度。此外, 主观评价的不确定性导致其无法用数学模型进行描述, 因而难以实现高质量的评价^[5]。客观评价是通过一定的算法采用数学手段对图像视觉质量的评价。客观评价包括全参考图像质量评价(Full-Reference Image Quality Assessment, FR-IQA)、半参考图像质量评价(Reduced-Reference Quality Assessment, RR-IQA)和无参考图像质量评价(No-Reference Image Quality Assessment, NR-IQA)^[6-7]。因为水下图像处理技术发展时间较短, 研究人员对于该技术还未达到共识, 同时因为无法获取高质量的水下参考图像, 所以现存的水下图像质量评价多数为无参考图像质量评价。

在水下图像处理技术发展的早期, 研究人员对水下图像质量评价主要是主观评价或者对大气图像质量的客观评价, 得到的结果不能准确地反映水下图像的实际质量^[8-10]。近年来, 一些无参考图像的水下图像质量客观评价方法被相继提出。这些方法是在捕捉人类视觉系统(Human Visual System, HVS)的客观性和感知的基础上, 结合水下图像的光吸收和散射效应对水下图像进行的综合评价。文献[11]提出对比度是度量水下图像质量的合理依据。文献[12]针对存在噪声影响的水下图像提出基于加权灰度尺度角(Weighted Gray Scale Angle, WGSa)的图像清晰度评价标准。文献[13]根据文献[14]的结果确定了衡量直方图与指数分布接近程度的稳健性指数, 该指数的数值范围为(0, 1)。对于大部分对比度较好且无噪声的图像, 除了梯度幅度直方图在均匀区域对应的低梯度下有一个小峰值外, 其他直方图接近指数分布。

文献[17]受HVS启发针对水下图像退化的特点提出了水下图像质量度量(Underwater Image Quality Metric, UIQM)方法, 这是一种无参考图像的水下图像质量评价方法。UIQM以水下图像色彩测量(Underwater Image Colorfulness Measure, UICM)、水下图像清晰度测量(Underwater Image Sharpness Measure, UISM)和水下图像对比度测量(Underwater Image Contrast Measure, UIConM)3个分量的线性组合作为评价依据。

文献[18]将水下图像从红绿蓝(Red Green Blue, RGB)颜色空间转换到更加符合人类视觉感知的CIELab颜色空间, 通过将图像的色度测量分量、对比度测量分量和饱和度测量分量进行线性组合, 提出一种量化水下图像非均匀颜色退化现象、模糊现象以及对比度变化的水下彩色图像质量评价(Underwater Color Image Quality Evaluation, UCIQE)方法。

上述水下图像质量评价方法虽然对于水下图像退化的部分方面能得到较有效的结果, 但是大部分评价方法与基于人类客观视觉的平均主观评价关联度较低。因此, 建立客观、有效且与人类主观评价关联度较高的

水下彩色图像质量评价指标成为水下图像处理领域的研究重点。

本文提出一种水下图像质量评价(Underwater Image Quality Assessment, UIQA)方法。以色彩饱和度测量分量、亮度对比度测量分量和图像清晰度测量分量作为评价依据, 对影响评价结果的各分量进行研究, 通过与其他水下图像质量评价方法进行对比, 分析与人类主观评价的相关性。

1 基于HVS的水下图像质量评价指标

光在水中的吸收和散射会影响水下成像系统的整体性能。光的吸收会导致水下图像颜色退化或者过度饱和, 光的散射会导致水下图像模糊和对比度降低(水中浮游生物和悬浮颗粒会使目标图像的边缘结构和相对对比度发生变化)。同时, 由于人存在视觉差异, 水下图像属性的变化会导致视觉感观不同。

文献[15]基于HVS的特性发现将图像和统计数据相结合可以有效表示色彩。文献[16]用红-绿色通道和黄-蓝色通道在相对颜色空间中定义颜色, 对于彩色图像*i*存在以下关系式:

$$\alpha = R - G \quad (1)$$

$$\beta = 0.5 \times (R + G) - B \quad (2)$$

其中, α 为红-绿色通道, β 为黄-蓝通道, R 为红通道, G 为绿色通道, B 为蓝通道。

基于相对颜色空间, 文献[17]提出的U2QM方法用公式表示为:

$$UIQM = c_1 \times UICM + c_2 \times UISM + c_3 \times UIConM \quad (3)$$

其中, c_1 、 c_2 和 c_3 分别为线性组合中各测量分量的权重因子。权重因子根据质量评价的具体要求而定: 当对图像颜色要求较高时, c_1 数值较大; 当对图像对比度要求较高时, c_2 数值较大; 当对图像清晰度要求较高时, c_3 数值较大。

文献[18]提出的UCIQE方法用公式表示为:

$$UCIQE = c_1 \times \sigma_c + c_2 \times \text{con}_l + c_3 \times \mu_s \quad (4)$$

其中, σ_c 为图像色度测量分量, con_l 为图像对比度测量分量, μ_s 为图像饱和度测量分量, c_1 、 c_2 和 c_3 分别为线性组合中各测量分量的权重因子。

文献[16-18]提出的用于水下图像质量评价的UIQM方法和UCIQE方法虽然能得到较合理的图像质量评价结果, 但是存在缺陷。其中, UIQM方法将色彩、清晰度和对比度作为评价水下图像质量的依据, 虽然该方法覆盖范围较广, 但其权重参数采用的是手工赋固定值的方法, 而水下图像的颜色退化类型较多且复杂, 固定的权重参数会造成图像质量评价结果与人类视觉感知不一致。UCIQE方法虽然通过预测采用针对某一数据集最优化的权重参数, 但其只将基于CIELab空间的色度、饱和度和对比度作为评价水下图像质量的依据, 并未考虑清晰度等其他因素, 造成该方法覆盖范围不足, 导致评价结果

不理想。本文提出一种 UIQA 方法,针对上述两种方法存在的问题进行如下改进:

1) 对于颜色分量(色彩分量和色度分量),采用 UCIQE 方法基于 CIELab 相对颜色空间的色度求出图像颜色饱和度,既保留了色度对整体图像质量评价的影响,又兼顾了颜色饱和度分量测量。

2) 对于对比度分量,在 UIQM 对比度分量 UIConM 的基础上进行改进,采用暗通道对比度提取测量的方法^[19],UCIQE 方法对对比度变化的把握更具敏锐性。

3) 保留了对水下图像清晰度分量的测量,在一定程度上弥补了 UCIQE 方法中测量范围不足的缺陷。

4) 采用多重线性回归方程对数据估算出最优化权重参数。

2 UIQA 方法

基于 HVS 对颜色、边缘结构和相对对比度变化的敏感性^[20],本文提出的水下图像质量评价指标 UIQA 方法以基于 CIELab 表色系的色彩饱和度(UIQA_saturation)、基于暗通道理论的对比度(UIQA_contrast)和边缘结构清晰度(即锐度,UIQA_sharpness)作为测量分量。

2.1 水下图像色彩饱和度测量分量

水下图像随着水深的增加会发生严重的颜色退化,造成图像模糊不清。由于红光的波长最短,红光会先消失,因而水下图像以绿色为主色调。此外,有限的光照条件也会导致水下图像出现褪色现象^[21]。

在研究水下图像色彩时,需考虑其与主观测试数据的相关性。因此根据 HVS 的特性,UIQA 方法选择 CIELab 表色系作为量化图像的颜色空间。CIELab 表色系为统一的颜色空间,假设 I_p 是图像在 CIELab 表色系中的像素值,图像有 N 个像素,则 $I_p = [L_p, \alpha_p, \beta_p]$,其中 $p = 1, 2, \dots, N$ 。基于 CIELab 表色系的水下图像色彩饱和度可表示为:

$$\text{UIQA_saturation} = \frac{1}{N} \sum_{p=1}^N \frac{C_p}{L_p} \quad (5)$$

$$C_p = \sqrt{\alpha^2 + \beta^2} \quad (6)$$

其中, C_p 为色度, L_p 为亮度。

采用色彩饱和度描述图像颜色是因为色彩饱和度与人类对水下彩色图像感知的相关性较好。在获取水下图像过程中通常采用人工照明,易产生“雪海现象”,这是水下图像出现褪色的主要原因,该现象中产生的白色亮点会严重影响图像处理的效果。然而,图像色调的分布不会受到“雪海现象”的影响,因而 UIQA 方法采取了基于 CIELab 色系的色彩饱和度作为测量分量。

图 1 是采用自动颜色均衡(Automatic Color Equalization, ACE)算法^[22]处理前后水下图像的色彩饱和度对比。由图 1(a)可以看出,水下图像存在着严重的颜色退化现象。由图 1(b)可以看出,ACE 算法处理有效地平衡了

色彩饱和度,色彩饱和度为水下图像赋予了更大的色彩测量值。结果表明,利用基于 CIELab 表色系的 UIQA_saturation 对水下图像的色彩质量进行了成功评价。

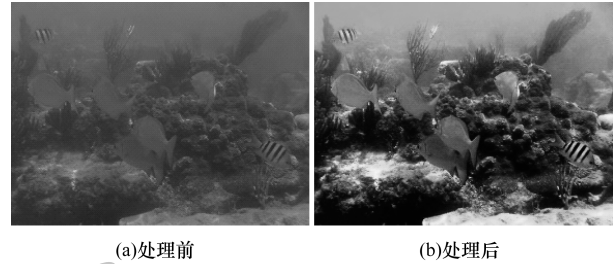


图 1 采用 ACE 算法处理前后水下图像的色彩饱和度对比
Fig. 1 Comparison of color saturation of underwater image before and after processing with ACE algorithm

2.2 水下图像对比度测量分量

对比度是图像中最亮区域和最暗区域之间亮度差异的尺度,对比度越大表明差异越大,对比度越小表明差异越小。图像对比度较小通常由图像像素分布不均造成,且对比度与视觉敏锐度成正比。水下图像对比度偏小通常由光的后向散射导致^[23]。

在获取水下图像的过程中,拍摄设备离水平面的距离越远,图像中颜色较暗的景物越多。与大气中的图像相比,水下图像的明暗对比更不明显,暗通道的水下图像具有更小的对比度,因而图像增强前后其对比度变化更明显。

对于任意彩色图像,其暗通道 J_{dark} 可以用以下公式表示:

$$J_{\text{dark}}(x) = \min_{y \in \Omega(x)} \left(\min_{c \in \{R, G, B\}} J_c(y) \right) \rightarrow 0 \quad (7)$$

其中, J_c 为彩色图像的每个通道, $\Omega(x)$ 为以像素 x 为中心的一个窗口。

通过水下图像的暗通道图可测量出图像的对比度,用公式表示为:

$$\text{UIQA_contrast} = \sum_{\delta} \delta(i, j)^2 P_{\delta}(i, j) \quad (8)$$

其中, $\delta(i, j) = |i - j|$ 为相邻像素间的灰度差, $P_{\delta}(i, j)$ 为相邻像素间灰度差为 δ 的像素分布概率。

图 2 是采用自动红通道水下图像恢复(Automatic Red-Channel Underwater Image Restoration, ARC)算法^[24]处理前后水下图像的对比度对比。由图 2 可以看出,经过 ARC 算法处理后水下图像的能见度比处理前显著提高,图像的对比度比处理前更大。

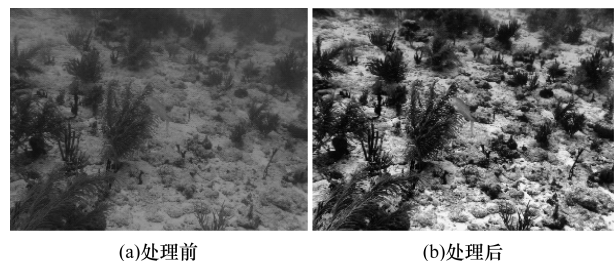


图 2 采用 ARC 算法处理前后水下图像的对比度对比
Fig. 2 Comparison of contrast of underwater images before and after processing with ARC algorithm

2.3 水下图像清晰度测量分量

水下图像由于光存在前向散射,造成图像严重模糊,导致图像清晰度下降。图像锐度可以反映出图像细节和边缘的清晰程度。UIQA方法采用 Sobel 边缘检测器对 RGB 中每个颜色通道进行检测,得到其二值边缘映射,再将二值边缘映射值与图像的原始值相乘得到 3 个灰度边缘映射值,这是为了保留原始水下图像边缘的像素值。增强测量估计(Enhanced Measurement Estimation, EME)方法适用于测量背景均匀且显示非周期模式的图像^[25],水下图像符合这一要求。因此,UIQA 方法用 EME 方法测量水下图像边缘的锐度,锐度的计算公式如下:

$$\text{UIQA_sharpness} = \sum_{c=1}^3 \lambda_c \text{EME}(\text{grayscale edge}_c) \quad (9)$$

$$\text{EME} = \frac{2}{k_1 k_2} \sum_{l=1}^{k_1} \sum_{k=1}^{k_2} \ln \left(\frac{I_{\max,k,l}}{I_{\min,k,l}} \right) \quad (10)$$

其中, $\frac{I_{\max,k,l}}{I_{\min,k,l}}$ 表示图像分为 $k_1 k_2$ 个块后各块内的相对对比度, λ_c 为相对视觉响应系数,每个 RGB 颜色分量中的 EME 测量值与 λ_c 呈线性组合,其中基于 R、G、B 三通道的相对视觉响应系数 $\lambda_R = 0.299$ 、 $\lambda_G = 0.587$ 、 $\lambda_B = 0.114$ 。

图 3 是采用 ARC 算法处理前后水下图像的清晰度对比。由图 3 可以看出,经过 ARC 算法处理后的水下图像的清晰度比处理前有显著提高,图像的锐度比处理前更大。

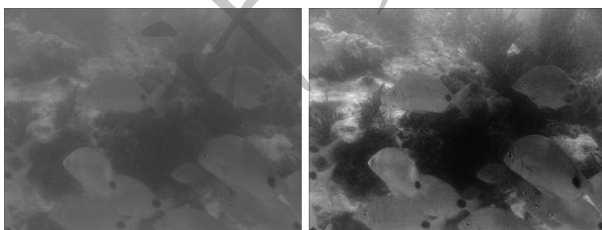


图 3 采用 ARC 算法处理前后水下图像的清晰度对比
Fig. 3 Comparison of sharpness of underwater images before and after processing with ARC algorithm

2.4 水下图像质量评价指标

根据文献[26]中水下成像模型可知,水下图像为光的吸收和散射分量的线性叠加。而光的吸收和散射效应会导致水下图像颜色退化、清晰度降低和对比度下降。因此,本文利用线性叠加模型生成基于 HVS 的水下图像质量评价 UIQA 方法来评价水下图像的整体质量水平,相关评价指标表示如下:

$$\text{UIQA} = c_1 \text{UIQA_saturation} + c_2 \text{UIQA_contrast} + c_3 \text{UIQA_sharpness} \quad (11)$$

其中, c_1 、 c_2 、 c_3 分别为线性组合中各测量分量的权重因子,权重因子根据质量评价的具体要求而定:当对图像色彩饱和度要求较高时, c_1 数值较大;当对图像对比度要求较高时, c_2 数值较大;当对图像锐度要求

较高时, c_3 数值较大。通常水下图像使用固定的 c_1 、 c_2 和 c_3 。

为确定测量水下图像褪色的最佳参数,进行一组主观测试如下:随机挑选 40 名志愿者并向每个志愿者展示了 40 幅水下图像,图像均来自网络并由不同设备在不同地点获取,且存在图像模糊、对比度和饱和度低、色偏、“雪海现象”等褪色问题。图像随机显示后,志愿者按照从 0 到 1 的评分区间对每张水下图像的质量进行评级,分数越高代表志愿者对图像的满意度越高。每幅图像显示 4 次,在上一幅图像评价结束前,志愿者无法对下一幅图进行评价。测试结束后计算 MOS。

本文选择其中 30 幅图像,获取其 UIQA_saturation、UIQA_contrast 和 UIQA_sharpness 的值,其中选出了 5 组不同场景且 MOS 不同的水下图像,如图 4 所示。表 1 为图 4 中各图像所对应的 UIQA_saturation、UIQA_contrast、UIQA_sharpness 和 MOS 值,利用多重线性回归(Multiple Linear Regression, MLR)的方法,得到 c_1 、 c_2 和 c_3 的值分别为 0.142 7、0.820 6 和 0.117 1。

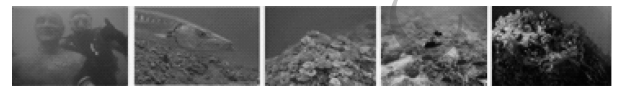


图 4 不同场景下的水下图像

Fig. 4 Different scenes underwater images

表 1 采用 UIQA 方法对图 4 中不同水下图像的质量评价各分量和 MOS 结果

Table 1 Various components and MOS results of different underwater images quality evaluation in Fig. 4 obtained by UIQA method

项目	图 4(a)	图 4(b)	图 4(c)	图 4(d)	图 4(e)
UIQA_saturation	0.362 2	0.392 2	0.411 4	0.460 6	0.362 2
UIQA_contrast	0.044 9	0.376 3	0.362 1	0.490 3	1.596 4
UIQA_sharpness	0.862 2	0.821 7	1.688 0	1.575 2	1.769 5
MOS 值	0.400 0	0.500 0	0.600 0	0.700 0	0.800 0

用其余图像对 c_1 、 c_2 和 c_3 的准确性进行验证。图 5 是选取的 3 幅不同场景的水下图像,表 2 为图 5 中各图像所对应的 UIQA_saturation、UIQA_contrast、UIQA_sharpness、UIQA 分数和 MOS 值,可见图 5(c) 的 MOS 最高,图 5(a) 的 MOS 最低,采用 UIQA 方法得到的图像质量评价结果 UIQA 和 MOS 一致,这说明 c_1 、 c_2 和 c_3 具有较高的准确性。



图 5 不同场景下的水下图像

Fig. 5 Underwater images in different scenes

表 2 采用 UIQA 方法对图 5 中不同水下图像的进行质量评价各分量分数、UIQA 分数和 MOS 值

Table 2 Quality evaluation components and UIQA scores and MOS value of different underwater images in Fig. 5 obtained by UIQA method

项目	图 5(a)	图 5(b)	图 5(c)
UIQA_saturation	0.411 4	0.310 5	0.392 2
UIQA_contrast	0.013 5	0.203 3	0.340 9
UIQA_sharpness	0.628 3	1.444 8	1.689 7
UIQA 分数	0.537 7	0.575 8	0.663 6
MOS 值	0.500 0	0.600 0	0.700 0

3 实验结果与分析

UIQA 方法可以从图像的色彩饱和度、对比度和清晰度 3 个属性分量独立评价水下图像质量。为证明 UIQA 方法的评价结果与目前评价效果较优的 UIQM 方法和 UCIQE 方法的评价结果一致甚至更佳,首先对 UIQA 方法中每个属性分量进行基准测试并与最优方法的属性分量进行比较,再分别采用 UIQA 方法、UIQM 方法和 UCIQE 方法进行对比实验。其中 UIQM 方法中各测量分量的权重因子 C_1 、 C_2 、 C_3 分别为 0.028 2、0.295 3、3.575 3, UICQE 方法中各测量分量的权重因子 C_1 、 C_2 、 C_3 分别为 0.468 0、0.274 5、0.257 6。3 种方法得到的评价结果得分越高表示水下图像质量越好。

3.1 属性分量对比实验

图 6 为水下原始图像及其经过不同色彩增强算法处理后的结果。

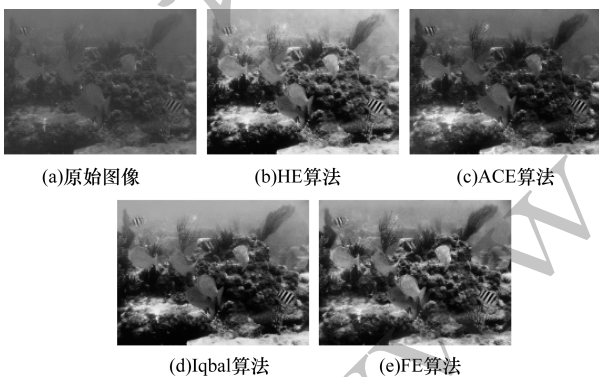


图 6 采用不同色彩增强算法处理前后的水下图像
Fig. 6 Underwater images before and after processing with different color enhancement algorithms

图 6(a)为未经处理的原始图像,可见其褪色明显,其中青绿色光投射过强,红通道退化严重。图 6(b)~图 6(e)为分别经过直方图均衡(Histogram Equalization, HE)算法、自动色彩均衡算法(Automatic Color Enhancement, ACE)算法、Iqbal 算法^[27]、融合增强(Fusion Enhance, FE)算法^[28]等 4 种不同色彩增强算法处理后得到的图像。由图 6(b)可以看出,采用 HE 算法处理后图像中出现了色彩过度增强的

区域,且图像的色彩饱和度发生改变。由图 6(c)可以看出,采用 ACE 算法后图像获得较好的动态效果,但是色彩饱和度太低且对比度不足,图像较模糊。由图 6(d)可以看出,采用 Iqbal 算法处理后图像的色彩饱和度明显增强,且整体颜色较和谐。由图 6(e)可以看出,采用 FE 算法处理后图像的颜色恢复情况良好,色彩较自然。综上可见,和未经处理的图像色彩质量相比,图 6(b)~图 6(e)的色彩质量均有一定提高,其中图 6(d)的色彩质量最好。

由表 3 可以看出,采用 UIQM 方法、UCIQE 方法得到的水下图像质量评价颜色分量 UICM、 σ_c 最大值出现在图 6(b)和图 6(c)处,只有采用 UIQA 方法得到的水下图像质量评价颜色分量 UIQA_saturation 最大值出现在图 6(d)处,这说明采用 UIQA 方法得到的水下图像质量评价结果能更准确地反映图片实际质量情况。

表 3 采用不同方法得到的水下图像质量评价颜色分量
Table 3 Color components of underwater image quality evaluation obtained by different methods

图像	UICM	σ_c	UIQA_saturation
图 6(a)	2.635 2	0.804 6	0.392 2
图 6(b)	13.744 7	0.784 1	0.393 2
图 6(c)	5.562 6	0.853 6	0.485 0
图 6(d)	13.002 4	0.788 3	0.499 8
图 6(e)	9.921 4	0.787 1	0.473 8

图 7 为水下原始图像及其经过不同清晰化算法处理后的结果。图 7(a)为未经处理的原始图像,可见其具有对比度低且物体边缘不清晰的问题。图 7(b)~图 7(e)为经过水下暗通道先验(Underwater Dark Channel Prior,UDCP)^[29]算法、ARC 算法、多尺度相关小波(Multi-Scale Correlated Wavelet, MSCW)^[30]算法、全色图像锐化(Panchromatic Image Sharpening, Pan)算法^[31]等 4 种不同清晰化算法处理后得到的图像。由图 7(b)~图 7(e)可以看出,处理后图像对比度比原始图像均有所提升,其中经过 UDCP 算法处理后的图像色彩明暗失衡,图像质量不佳;经过 Pan 算法处理后图像的色彩明暗对比度比其他算法处理后的更清晰。

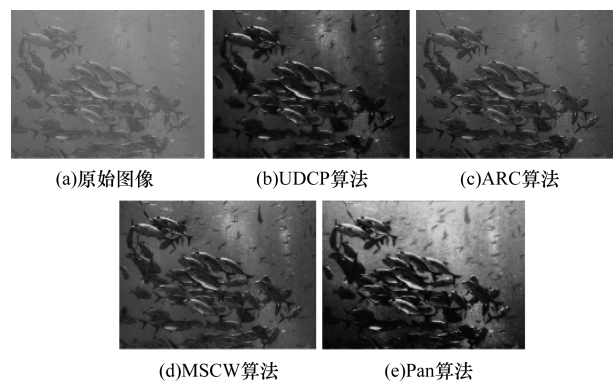


图 7 采用不同清晰化算法处理前后的水下图像
Fig. 7 Underwater images before and after processing with different clarity algorithms

由图 8 可以看出,采用不同清晰化算法处理后图像的清晰度比原始图像均有所提升;经过 UDCP 算法、ARC 算法、MSCW 算法处理后图像中鱼群交叠处边缘模糊,局部细节不清晰;经过 Pan 算法处理后的图像更清晰,图像中鱼群交叠处及边缘更明显。

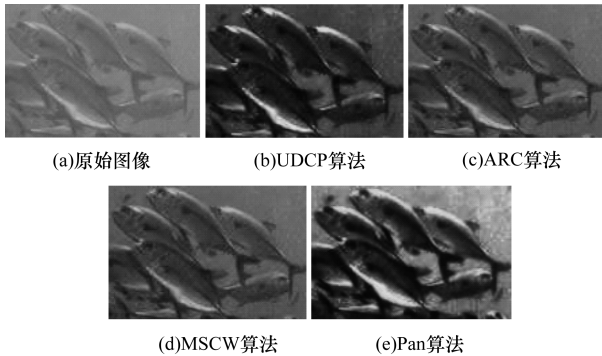


图 8 采用不同清晰化算法处理前后的水下图像局部放大图
Fig. 8 Partial enlarged images of underwater images before and after processing with different clarity algorithms

由表 4 可以看出,采用 UIQM 方法、UCIQE 方法和 UIQA 方法得到的水下图像质量评价对比度分量 $UIQM_c$ 、 σ_c 和 $UIQA_contrast$ 最大值均出现在图 7(e) 处,这说明采用上述 3 种方法得到的水下图像质量评价结果相近。采用 UIQA 方法得到的图 7(a) ~ 图 7(e) 的图像质量评价锐度分量 $UIQA_sharpness$ 分别为 0.887 1, 0.816 6, 1.065 8, 1.047 1, 1.402 2, 其中最大值也出现在图 7(e),由此可见,表 4 和图 7 的分析结果一致。

表 4 采用不同方法得到的水下图像质量评价对比度分量

Table 4 Contrast components of underwater image quality evaluation obtained by different methods

图像	UIConM	σ_c	UIQA_contrast
图 7(a)	0.817 4	0.290 2	0.165 5
图 7(b)	1.185 4	0.702 0	0.527 8
图 7(c)	1.041 1	0.494 1	0.344 8
图 7(d)	1.153 0	0.639 2	0.588 5
图 7(e)	1.229 2	0.854 9	0.911 4

3.2 UIQA 方法与其他水下图像质量评价方法

为验证 UIQA 方法的鲁棒性,分别采用 UIQA 方法与 UIQM 方法、UCIQE 方法等其他水下图像质量评价方法进行对比实验。图 9(a) 为未经处理的原始图像,图 9(b) ~ 图 9(f) 为分别经过 Iqbal 算法、UDCP 算法、FE 算法、ARC 算法和 Pan 算法等图像增强算法处理后得到的图像。可见经过 Iqbal 算法处理后图像中的鱼类边缘更清晰,图像的色彩饱和

度和对比度增强效果最佳;经过 FE 算法处理后图像质量仅次于经过 Iqbal 算法处理后的;经过 Iqbal 算法处理后的图像色调呈现为蓝色,整体色调不理想,鱼类边缘不明显且图像对比度较低。

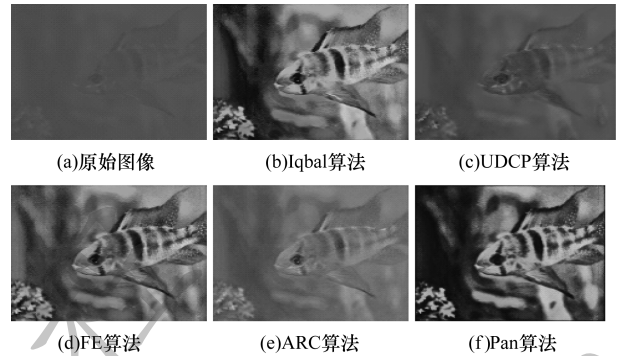


图 9 经过不同图像增强算法处理前后的水下图像
Fig. 9 Underwater images before and after processing with different image enhancement algorithms

由表 5 可以看出,采用 UIQM 方法、UCIQE 和 UIQA 方法得到的水下图像质量评价各分量平均值以及 MOS 的最大值均出现在图 9(b) 处,这与上述对图 9 的质量分析结果吻合,也说明采用上述 3 种方法得到的水下图像质量评价结果具有较好的一致性。

表 5 采用不同方法得到的水下图像质量评价各分量平均值以及 MOS 结果

Table 5 Average value of each component of underwater image quality evaluation and MOS results obtained by different methods

图像	UIQM 各分量 平均值	UCIQE 各分量 平均值	UIQA 各分量 平均值	MOS
图 9(a)	0.375 5	0.290 9	0.311 7	0.3
图 9(b)	1.625 2	0.703 0	0.714 8	0.7
图 9(c)	0.971 0	0.431 6	0.418 6	0.4
图 9(d)	1.529 5	0.652 9	0.586 9	0.6
图 9(e)	0.879 7	0.481 2	0.485 0	0.5
图 9(f)	1.425 5	0.637 0	0.599 9	0.6

为进一步证明 UIQA 方法与人类主观视觉具有更大相关性,在上述对比实验中应用皮尔森线性相关系数 (Pearson Linear Correlation Coefficient, PLCC)、均方根误差 (Root Mean Squared Error, RMSE) 和斯皮尔曼秩相关系数 (Spearman Rank Order Correlation Coefficient, SROCC) 进行分析。其中,PLCC 和 SROCC 越接近 1, RMSE 越接近 0,则该水下图像质量评价方法得到的结果与人类主观评价相关性越大。

由表 6 可以看出,与 UIQM 方法和 UCIQE 方法相比,UIQA 方法中的 PLCC、SROCC 和 RMSE 指标均为最优,说明其得到的水下图像质量评分与人类主观评价具有较好的相关性,由此也证明 UIQM 方法具有鲁棒性,该方法更符合人类视觉的客观感知。

表6 采用不同方法得到的评价结果

指标	UIQM	UCIQE	UIQA
PLCC	0.645 7	0.654 2	0.870 5
RMSE	0.089 2	0.088 3	0.054 2
SROCC	0.581 5	0.603 8	0.748 4

综上所述,采用 UIQA 方法可以准确地得到符合 HVS 的水下图像质量评价结果,该结果与采用 UIQM 方法和 UCIQE 方法得到的结果基本一致,且采用 UIQA 方法得到的评价结果更符合人类的视觉感知,与人类主观评价相关性更大,更适合应用于实际水下环境,是一种较好的水下图像质量评价方法。

4 结束语

本文提出一种基于人类视觉系统进行水下图像质量评价的 UIQA 方法。将图像色彩饱和度、对比度和清晰度进行线性组合,对不同场景水下图像进行分析。实验结果表明,UIQA 方法较 UIQM 方法和 UCIQE 方法与人类主观评价相关性更高,可以直观地反映出人类的真实感受。下一步将结合卷积神经网络对特殊水下图像质量进行研究,进一步优化水下图像质量评价方法。

参考文献

- [1] MANTIUK R, KIM K J, REMPEL A G, et al. HDR-VDP-2: a calibrated visual metric for visibility and quality predictions in all luminance conditions[J]. ACM Transactions on Graphics, 2011, 30(4): 40-47.
- [2] HU Huili, CHEN Qingkui, ZHUANG Songlin. Assessment method for 3G video definition based on computer unified device architecture [J]. Computer Engineering, 2011, 37(18): 264-265. (in Chinese)
胡慧丽,陈庆奎,庄松林.基于 CUDA 的 3G 视频清晰度评估方法[J].计算机工程,2011,37(18):264-265.
- [3] GUO Jichang, LI Chongyi, GUO Chunle, et al. Research progress of underwater image enhancement and restoration methods[J]. Journal of Image and Graphics, 2017, 22(3): 273-287. (in Chinese)
郭继昌,李重仪,郭春乐,等.水下图像增强和复原方法研究进展[J].中国图象图形学报,2017,22(3):273-287.
- [4] LIU T J, LIN Y C, LIN W S, et al. Visual quality assessment: recent developments, coding applications and future trends [J]. APSIPA Transactions on Signal and Information Processing, 2013, 2: 4-12.
- [5] GUO Jichang, LI Chongyi, ZHANG Yan, et al. Quality assessment method for underwater images[J]. Journal of Image and Graphics, 2017, 22(1): 1-8. (in Chinese)
郭继昌,李重仪,张艳,等.面向水下图像的质量评价方法[J].中国图象图形学报,2017,22(1):1-8.
- [6] LIU X L, VAN DE WEIJER J, BAGDANOV A D. RankIQA: learning from rankings for No-reference image quality assessment [C]//Proceedings of 2017 IEEE International Conference on Computer Vision. Venice, Italy: IEEE Press, 2017: 125-130.
- [7] WANG Wei, LIU Jing, YANG Weiwei, et al. Blur image quality assessment based on DCT domain texture structure similarity [J]. Computer Engineering, 2015, 41(11): 253-256. (in Chinese)
王威,刘婧,杨蔚蔚,等.基于 DCT 域纹理结构相似度的模糊图像质量评价[J].计算机工程,2015,41(11):253-256.
- [8] OUYANG B, DALGLEISH F, VUORENKOSKI A, et al. Visualization and image enhancement for multistatic underwater laser line scan system using image-based rendering[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2013, 38(3): 566-580.
- [9] AGAIAN S S, JASSIM S A, DU E Y, et al. SPIE proceedings [SPIE SPIE sensing technology + applications-baltimore, maryland, united states (Monday 20 April 2015)] mobile multimedia/image processing, security, and applications 2015-color image retrieval and analysis using image color measures [J]. Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering, 2015, 9497: 2-9.
- [10] MA Yun, WANG Xiaodong, FU Xianzu, et al. Non-reference stereoscopic image quality assessment based on GA-SVR model [J]. Computer Engineering, 2017, 43(5): 234-239. (in Chinese)
马允,王晓东,富显祖,等.基于 GA-SVR 模型的无参考立体图像质量评价[J].计算机工程,2017,43(5):234-239.
- [11] 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.
- [12] HOU W L, WEIDEMANN A D, Gray D, et al. Imagery-derived modulation transfer function and its applications for underwater imaging [C]//Proceedings of Applications of Digital Image Processing. Washington D. C., USA: International Society for Optics and Photonics, 2007: 1-6.
- [13] ARNOLD-BOS A, MALKASSE J P, KERVERN G. Towards a model-free denoising of underwater optical images [C]//Proceedings of Europe Oceans 2005. Brest, France: IEEE Press, 2005: 1-7.
- [14] ARREDONDO M, LEBART K. A methodology for the systematic assessment of underwater video processing algorithms [C]//Proceedings of Europe Oceans 2005. Brest, France: IEEE Press, 2005: 362-367.
- [15] HASLER D, SUESSTRUNK S E. Measuring colorfulness in natural images [C]//Proceedings of Human Vision and Electronic Imaging 2003. Santa Clara, USA: IEEE Press, 2003: 203-211.
- [16] FU Yanyu. Color image quality measures and retrieval [M]. New Jersey, USA: New Jersey Institute of Technology, 2006.
- [17] 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.
- [18] YANG M, SOWMYA A. An underwater color image quality evaluation metric [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2015, 24(12): 6062-6071.
- [19] JIANG Jianguo, HOU Tianfeng, QI Meibin. Improved algorithm on image haze removal using dark channel prior [J]. Journal of Circuits and Systems, 2011, 16(2): 7-12. (in Chinese)

- 蒋建国,侯天峰,齐美彬.改进的基于暗原色先验的图像去雾算法[J].电路与系统学报,2011,16(2):7-12.
- [20] PANETTA K,AGAIAN S,ZHOU Y C,et al. Parameterized logarithmic framework for image enhancement [J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics),2011,41(2):460-473.
- [21] LI Chongyi, GUO Jichang, CONG Runming, 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.
- [22] GATTA C,RIZZI A,Marini D. ACE:an automatic color equalization algorithm[C]//Proceedings of Conference on Colour in Graphics. Salt Lake, USA: Society for Imaging Science and Technology,2002:115-121.
- [23] HUANG Dongmei, WANG Yan, SONG Wei, et al. Underwater image enhancement method using adaptive histogram stretching in different color models [J]. Journal of Image and Graphics,2018,23(5):640-651. (in Chinese)
黄冬梅,王龔,宋巍,等.不同颜色模型下自适应直方图拉伸的水下图像增强[J].中国图象图形学报,2018,23(5):640-651.
- [24] 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.
- [25] PANETTA K,GAO C,AGAIAN S.No reference color image contrast and quality measures [J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics,2013,59(3):643-651.
- [26] LI Li, WANG Huigang, LIU Xing. Underwater image enhancement based on improved dark channel prior and color correction[J]. Acta Optica Sinica,2017,37(12):176-184. (in Chinese)
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,2017,37(12):176-184.
- [27] IQBAL K,ABDUL S.R,OSMAN M,et al. Underwater image enhancement using an integrated colour model [J]. IAENG International Journal of Computer Science,2007,32(2):239-244.
- [28] ANCUTI C, ANCUTI C O, HABER T, et al. Enhancing underwater images and videos by fusion [C]// Proceedings of 2012 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Providence, USA: IEEE Press,2012:7-15.
- [29] CODEVILLA F M, BOTELHO S S D C, DREWS P, et al. Underwater single image restoration using dark channel prior[C]//Proceedings of NAVTEC'16. Washington D. C., USA:IEEE Press,2016:21-29.
- [30] XIN Liu, HE Zhang, CHEUNG Yiuming, et al. Efficient single image dehazing and denoising: an efficient multi-scale correlated wavelet approach [J]. Computer Vision and Image Understanding,2017,162:23-33.
- [31] WANG Panpan, FEI Yuan, EN Cheng. Underwater image de-scattering and enhancing using dehazent and HWD [J]. Journal of Marine Science and Technology, 2018,26(4):531-540.