

# 基于透射率优化和色温调节的水下图像复原

倪锦艳<sup>1</sup>, 李庆武<sup>1,2</sup>, 周亚琴<sup>1</sup>, 漆 灿<sup>1</sup>

<sup>1</sup>河海大学物联网与工程学院, 江苏 常州 213022;

<sup>2</sup>常州市传感网与环境感知重点实验室, 江苏 常州 213022

**摘要** 针对水下光学彩色图像的模糊和颜色失真问题,提出一种基于透射率优化和色温调节的水下图像复原方法。将大气光暗原色先验去雾算法应用到水下光学成像模型中实现水下图像清晰化,采用引导滤波提高透射率的估计精度,然后通过设置阈值参数区分水下光学图像中的明亮区域与非明亮区域,对透射率进行优化处理得到自适应还原图像。最后通过调整图像估计灰度轴的位置对图像进行色温调节还原图像的颜色。实验结果表明,该算法不仅可以有效提高图像的清晰度,还可以对图像进行准确的颜色纠正。相比于其他算法,该算法实现效果好,具有更好的稳健性。

**关键词** 图像处理; 暗原色先验; 自适应还原; 色温调节; 颜色纠正

**中图分类号** TN911.73 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/LOP54.011001

## Underwater Image Restoration Based on Transmittance Optimization and Color Temperature Adjustment

Ni Jinyan<sup>1</sup>, Li Qingwu<sup>1,2</sup>, Zhou Yaqin<sup>1</sup>, Qi Can<sup>1</sup>

<sup>1</sup>College of Internet of Things Engineering, Hohai University, Changzhou, Jiangsu 213022, China;

<sup>2</sup>Changzhou Key Laboratory of Sensor Networks and Environment Sensing, Changzhou, Jiangsu 213022, China

**Abstract** Aimed at the mistiness and color distortion of underwater optical colorful image, an underwater image restoration method based on transmittance optimization and color temperature adjustment is proposed. Dark channel prior algorithm is applied to the underwater optical imaging model to realize the image visualization. Transmittance is improved by guided filter to increase its estimation precision. Then the image should be divided to bright areas and normal areas by setting threshold. Adaptive restored image is got by transmittance optimization. Finally the color of image is restored by adjusting the position of gray axis to rectify color temperature. Experimental result shows that the proposed algorithm can not only improve the clearness of image largely, but also correct the color accurately. Compared to other algorithms, the proposed algorithm have good results and robustness.

**Key words** image processing; dark channel prior; adaptive restore; color temperature adjustment; color correction

**OCIS codes** 100.2000; 010.7340; 010.7295

## 1 引 言

随着自主式水下机器人(AUV)的广泛应用,水下目标识别成为热点问题,获取准确有效的水下信息是进行目标识别的第一步。当前主要通过水下成像技术获取水下场景信息,水下成像技术包括声呐成像和光学成像。其中水下光学成像技术使用光源照射水下目标物体,利用摄像机等接收设备接收目标物的反射光进行成像。由于水中的悬浮介质颗粒对光的散射作用和水体对光的吸收作用,导致水下图像普遍存在模糊和颜色失真等问题。

光在水中的散射方式分为前向散射和后向散射<sup>[1]</sup>,两者都会对水下成像带来衰减影响,使图像出现雾状

**收稿日期:** 2016-08-15; **收到修改稿日期:** 2016-09-19; **网络出版日期:** 2016-12-23

**基金项目:** 国家自然科学基金(41306089)

**作者简介:** 倪锦艳(1994—),女,硕士研究生,主要从事数字图像处理方面的研究。E-mail: nijinyan1994@126.com

**导师简介:** 李庆武(1964—),男,博士,教授,主要从事智能感知与图像处理方面的研究。E-mail: Li\_qingwu@163.com

模糊。针对水下图像的模糊现象,研究学者们提出了多种解决方法<sup>[2-6]</sup>。Serikawa 等<sup>[2]</sup>采用联合三角滤波的方法对水下图像进行清晰化处理;姚凯<sup>[3]</sup>采用小波变换方法获取图像的聚集区域,再对聚集区域和非聚集区域进行融合得到水下清晰图像;许廷发等<sup>[4]</sup>对水下图像进行余弦小波变换,在低频空间引入新的图像梯度提高图像的细节;吴一全等<sup>[5]</sup>采用基于多尺度 Retinex 和混沌小生境粒子群优化的非下采样 Contourlet 变换对图像进行增强,改善图像质量;冯维一等<sup>[6]</sup>采用高光谱图像混合像元分解技术进行去雾,以增强图像的能见度。以上方法虽然可以提高图像的清晰度和对比度,但是不能很好地解决水下图像的颜色衰减问题以至于降低了它们的实用性。

水对光的吸收具有明显的选择性,不同波长的光谱在水下传播的距离不同。波长较长的红光在水下传播距离较近,波长较短的蓝光在水下传播距离较远,因此水下图像大多以蓝绿色调为主,存在明显的颜色失真。针对水下图像的颜色失真问题,许多学者展开了研究,并取得了一些成果<sup>[7-11]</sup>。其中杨森等<sup>[7]</sup>利用彩色模糊形态筛改善水下非均匀照明情况,然后通过围绕水体色彩的四元数几何旋转得到色彩平衡图像;Lu 等<sup>[8]</sup>提出了一种新模型  $\alpha$ ACE,并结合引导三角双边滤波对水下图像进行增强和颜色纠正;杨爱萍等<sup>[9]</sup>提出了一种先去除颜色失真,再去背景散射影响的方法;聂瑛等<sup>[10]</sup>将长波长的红光抗散射和较短波长的蓝绿光抗吸收两方面的光传输特征结合,通过红光和绿光照明采集图像的灰度线性插值以去除散射噪声信息,获取目标图像信息;李庆忠等<sup>[11]</sup>将 RGB 图像转到 HSV 空间,并利用离散小波变换将亮度  $V$  图像的高、低频子带分离,得到清晰化结果图像。上述算法虽然可以解决水下光学图像的颜色失真问题,但是成像设备比较复杂,同时算法的时间复杂度比较大。

本文针对以上算法存在的问题,提出了一种基于透射率优化和色温调节的水下图像复原方法。首先通过暗原色先验理论求取预估透射率,使用引导滤波对透射率进行精化处理;然后设置阈值区分水下图像的明亮与非明亮区域,对透射率进行可变调节以得到自适应还原图像;最后借助空间旋转矩阵和尺度变换值,将估计灰度轴调整至理想灰度轴的位置,调节图像的色温以达到还原图像颜色的目的。实验结果表明,本文算法可以同时解决水下光学图像的模糊和颜色失真问题,而且实验设备简单,极大程度地提高了图像的对比度,准确地还原了图像的真实颜色信息。

## 2 水下图像清晰化

由于水体对光的散射作用,水下光学图像存在模糊现象,清晰度很差。考虑到水下光学成像模型与大气光成像模型相似,而暗原色先验去雾算法<sup>[12]</sup>可以很好地处理大气光图像,因此本文借鉴该算法,将其应用于水下图像去模糊中,以得到清晰化图像。

### 2.1 水下光学成像物理模型

水下光学成像的物理模型主要由两部分组成:1)直接投射到物体表面的入射光;2)由于大气光介质颗粒而产生的散射光<sup>[13]</sup>。可以简化为

$$I(x) = J(x)t(x) + [1 - t(x)]A, \quad (1)$$

式中  $I$  为从成像设备中获取的图像, $J$  为场景辐射光, $t$  为视觉锥透射率, $A$  为大气光, $x$  表示像素点空间位置。这个物理模型假设反射光与物体到观察者之间的距离线性相关,其中  $t(x) = \exp[-\beta d(x)]$ , $\beta$  为媒体介质的衰减系数, $d(x)$  表示相机到物体之间的距离。

### 2.2 暗原色先验理论

假设透射率在局部块  $\Omega(x)$  中是个常量,记为  $\tilde{t}(x)$ ,然后对(1)式两边同时进行最小化操作,求出每一个颜色通道(RGB)上的暗通道,得到

$$\min_c \left\{ \min_{y \in \Omega(x)} \left[ \frac{I^c(y)}{A^c} \right] \right\} = \tilde{t}(x) \min_c \left\{ \min_{y \in \Omega(x)} \left[ \frac{J^c(y)}{A^c} \right] \right\} + [1 - \tilde{t}(x)], \quad (2)$$

式中  $C$  为 RGB 三通道之一, $I^c(y)$  是成像设备获取图像在通道  $C$  的像素值, $J^c(y)$  是场景辐射光在通道  $C$  的像素值, $A^c$  是大气光在通道  $C$  的值。

将暗通道所有的像素值从大到小排序处理,然后选取前 0.1% 的像素。在这些像素中,选定强度最大的值为全局背景光  $A$ 。根据暗通道先验知识,需要还原的无雾图像  $J$  通道  $J^{\text{dark}}$  应该趋向于 0,即

$$J^{\text{dark}}(x) = \min_c \left\{ \min_{y \in \Omega(x)} \left[ \frac{J^c(y)}{A^c} \right] \right\} = 0. \quad (3)$$

根据(2)和(3)式,得到预估透射率为

$$\tilde{t}(x) = 1 - \omega \min_c \left\{ \min_{y \in \Omega(x)} \left[ \frac{I^c(y)}{A^c} \right] \right\}, 0 < \omega \leq 1, \quad (4)$$

式中加入  $\omega$  参数是为了得到更精确的深度信息,确保图像更真实。

预估透射率一般通过软抠图的方法进行细化,但是软抠图求取的透射率存在块效应,且算法复杂度较高。本文采用引导滤波<sup>[14]</sup>对透射率的计算进行改进,引导滤波主要是建立一个关于输出图像  $q$  和引导图像  $I$  的局部线性模型,可以表示为

$$q_i = \frac{1}{|\omega|} \sum_{k: i \in \omega_k} (a_k I_i + b_k) = \bar{a}_i I_i + \bar{b}_i, \quad (5)$$

式中  $|\omega|$  表示窗口  $\omega_k$  中的像素个数,窗口  $\omega_k$  为一个以像素  $k$  为中心,  $r$  为半径的方形窗口。本文中,将原始图像的灰度图像作为引导图像  $I$ ,预估透射率图  $\tilde{t}(x)$  作为输入图像  $p$ ,得到的输出图像  $q$  即为优化处理的透射率  $t(x)$ 。将优化处理后的透射率代入到(1)式中,得到还原图为

$$J(x) = \frac{I(x) - A}{t(x)} + A. \quad (6)$$

### 2.3 透射率自适应可变调节

暗原色先验理论对于物体与背景光颜色相近的情况,适应性较差。本文针对该问题进行相关处理,从(4)式可知,在求取透射率时,如果物体和背景光颜色相似,即  $I^c(y)$  与  $A^c$  接近,则  $\tilde{t}(x)$  几乎接近于 0。若求取透射率时,不考虑暗原色先验原理,则可以得到透射率  $t_{\text{actual}}$  为

$$t_{\text{actual}} = \frac{1 - \min_c \left\{ \min_{y \in \Omega(x)} \left[ \frac{I^c(y)}{A^c} \right] \right\}}{1 - \min_c \left\{ \min_{y \in \Omega(x)} \left[ \frac{J^c(y)}{A^c} \right] \right\}}. \quad (7)$$

如果暗原色先验原理不成立,即  $\min_c \left\{ \min_{y \in \Omega(x)} \left[ \frac{J^c(y)}{A^c} \right] \right\} \neq 0$ , 则(7)式中分母项小于 1,所以实际透射率应大于通过暗原色先验得到的透射率。

本文增加一个阈值参数,定义其为限差  $Q$ ,为了避免背景光与物体区分不明显,同时可以有效地区分两者, $Q$  的取值不能过大也不能过小,取  $Q \in [40, 60]$ 。当  $|I(x) - A| < Q$  时,说明背景光与物体本身颜色相差不大,认为其为明亮区域;当  $|I(x) - A| > Q$  时,说明背景光与物体本身颜色相差比较大,认为此区域符合暗原色先验理论。所以改进的透射率为

$$t_{\text{end}}(x) = \max \left[ \frac{kQ}{|I(x) - A|} + p, 1 \right] \cdot t(x), \quad (8)$$

若物体颜色  $I(x)$  和背景光  $A$  值很接近,则  $\frac{Q}{|I(x) - A|}$  值很大,因此为了调节透射率,增加两个参数值  $k$  和  $p$ 。其中  $k$  为透射率伸缩系数,调节透射率的斜率变化,取  $k \in [0, 1]$ ;  $p$  为透射率增减系数,调节透射率的平移位置,取  $p \in [-20, 20]$ 。

将自适应调节后的透射率代入到(6)式中,得到最终的自适应还原图像。

综上所述,水下暗原色先验算法处理流程图如图 1 所示。

## 3 色温调节

由于水体对光的选择性吸收,水下图像整体以蓝绿色调为主。图像的色调由色温决定,若图像产生颜色失真,说明图像的色温发生偏移。而图像的灰度轴可以反映图像的色温信息,因此可以通过调整图像灰度轴来还原图像颜色。

图 2 为 RGB 空间示意图,图中 RGB 三分量的像素取值范围都为  $[0, 255]$ 。 $W$  点表示图像中最亮的点,

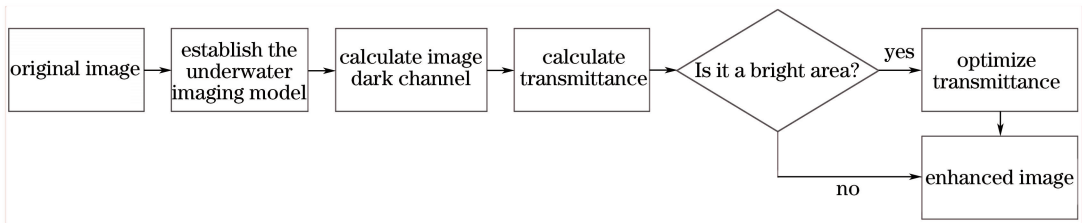


图 1 水下图像清晰化流程图

Fig. 1 Flow chart of underwater image visualization

$O$  点表示图像中最暗的点,  $OW$  上各点分别对应不同灰度级, 所以  $OW$  称为理想灰度轴<sup>[15]</sup>。  $E$  点表示图像的估计白点,  $B$  点表示图像的估计黑点,  $BE$  上各点的像素值表示原图像在偏色条件的强度值, 所以  $BE$  称为图像的估计灰度轴。这里所定义的理想灰度轴和估计灰度轴均已在图 2 上标出。

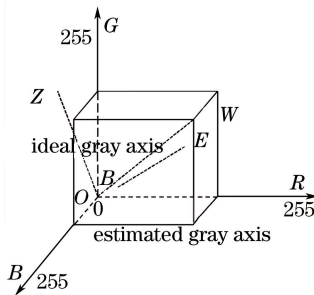


图 2 RGB 空间示意图

Fig. 2 Diagram of RGB space

首先选取图像中亮度最大和亮度最小的  $\alpha\%$  像素点, 构造成集合, 用  $\Omega_1$  和  $\Omega_2$  表示。  $E$  点和  $B$  点分别用  $\Omega_1$  和  $\Omega_2$  中各点三个颜色通道的平均值来表示, 即

$$r_e = \frac{1}{\alpha N} \sum_{(i,j) \in \Omega_1} r(i,j), g_e = \frac{1}{\alpha N} \sum_{(i,j) \in \Omega_1} g(i,j), b_e = \frac{1}{\alpha N} \sum_{(i,j) \in \Omega_1} b(i,j), \quad (9)$$

$$r_b = \frac{1}{\alpha N} \sum_{(i,j) \in \Omega_2} r(i,j), g_b = \frac{1}{\alpha N} \sum_{(i,j) \in \Omega_2} g(i,j), b_b = \frac{1}{\alpha N} \sum_{(i,j) \in \Omega_2} b(i,j). \quad (10)$$

为了避免成像环境中出现全反射的情况,  $\alpha$  的取值不能太小; 同时为了保证估计白色和估计黑色的精度,  $\alpha$  的取值不能太大。通过实验发现, 取  $\alpha \in [0.01, 0.001]$  可以同时满足以上两个条件, 因此本文取  $\alpha = 0.005$ 。估计灰度轴  $BE$  表示为

$$r_{be} = r_e - r_b + s, g_{be} = g_e - g_b + s, b_{be} = b_e - b_b + s, \quad (11)$$

式中  $s$  为调节参数, 为避免图像中的估计白点和估计黑点太接近, 导致结果图像失真。当  $s$  取值偏小时, 结果图像偏白; 当  $s$  取值偏大时, 结果图像偏暗。因此做适中处理, 取  $s = 50$ 。

将  $BE$  旋转至  $OW$  的过程是三维空间中绕任意轴旋转的问题<sup>[16]</sup>, 得到最终的旋转矩阵为  $\mathbf{M}$ 。

尺度变换值  $\beta$  定义为理想灰度轴  $OW$  和估计灰度轴  $BE$  两者模的比值, 即

$$\beta = \frac{\|OW\|}{\|BE\|} = \frac{\sqrt{r_{ow}^2 + g_{ow}^2 + b_{ow}^2}}{\sqrt{r_{be}^2 + g_{be}^2 + b_{be}^2}}. \quad (12)$$

用  $\{r(i,j), g(i,j), b(i,j)\}$  表示偏色图像中  $(i,j)$  位置上像素点的强度值, 借助于空间旋转矩阵和尺度变换值将估计灰度轴调整至理想灰度轴的位置, 得到最终的还原图像为

$$[r_t(i,j), g_t(i,j), b_t(i,j)] = \beta \{ [r(i,j), g(i,j), b(i,j)] \times \mathbf{M} \}. \quad (13)$$

综上所述, 色温调节流程图如图 3 所示。

## 4 实验结果与分析

对大量的水下模糊失真图像进行增强处理, 分别选取了三组图像: 单条鱼、鱼群 1、鱼群 2。分别将本文



图3 基于灰度轴的色调调整法流程图

Fig. 3 Flow chart of tonal adjustment method based on the gray axis

算法与文献[17]中的带色彩恢复的多尺度 Retinex 增强算法(MSRCR)、文献[18]中的波长补偿和图像去雾算法(WCID)和文献[2]中的联合三角滤波(JTF)进行对比。实验计算机硬件配置 Intel(R) Celeron(R) CPU B815@1.60GHz,软件平台为 Matlab R2010。实验中,设置  $\omega=0.95, k=0.5, p=-20, Q=60, s=50$ 。用于比较的 MSRCR、WCID 和 ITF 算法参数值均为最优条件。

#### 4.1 复原效果对比

本文算法的复原图像与其他算法的对比图分别如图 4~6 所示。图 4 为单条鱼实验图,图 5 为鱼群 1 实验图,图 6 为鱼群 2 实验图。从图 4(b)、5(b)中可以看出,MSRCR 算法处理得到的还原图像色彩偏白;从图 6(b)中可以看出,MSRCR 算法在处理颜色失真严重的图像时,还原图像色彩偏红,缺乏稳健性。从图 4(c)、5(c)、6(c)中可以看出,WCID 算法处理水下图像时,可以较好地对图像进行清晰化和色彩均衡,但是处理后的图像偏暗。从图 4(d)、5(d)、6(d)中可以看出,JTF 算法在去模糊上效果明显,但在颜色还原上效果欠佳。相比之下,本文算法能更好地对水下图像进行去模糊和颜色纠正,得到的复原图像清晰度更好,色彩也更加鲜艳。

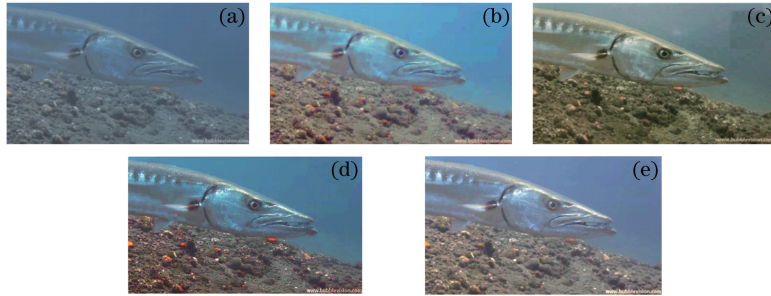


图4 水下单条鱼图像实验。(a) 原始图像;(b) MSRCR 算法;(c) WCID 算法;(d) JTF 算法;(e) 本文算法

Fig. 4 Image experiments of single fish. (a) Original image; (b) MSRCR algorithm; (c) WCID algorithm; (d) JTF algorithm; (e) proposed algorithm

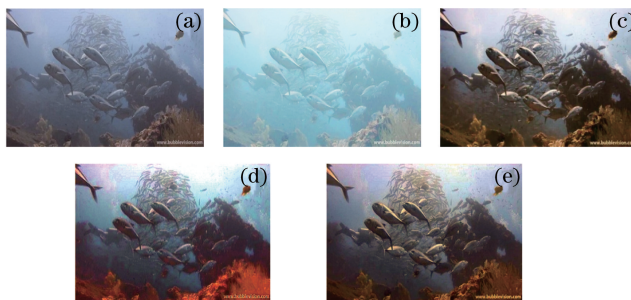


图5 水下鱼群 1 图像实验。(a) 原始图像;(b) MSRCR 算法;(c) WCID 算法;(d) JTF 算法;(e) 本文算法

Fig. 5 Image experiments of shoal 1 of fish. (a) Original image; (b) MSRCR algorithm; (c) WCID algorithm; (d) JTF algorithm; (e) proposed algorithm

#### 4.2 图像客观评价

为进一步说明实验效果,对实验结果图像进行客观评价。本文选取对比度、色彩分量相关性<sup>[17]</sup>和色彩分量百分比三个质量指标对图像复原结果进行客观评价。

对比度表示一幅图像中亮区和暗区之间的对比,反映图像整体的灰度分布和强弱差,对比度越高,图像质量越好。对比度公式为

$$\sigma^2 = \frac{1}{U \times V} \sum_{i=0}^U \sum_{j=0}^V [I(i, j) - \mu]^2, \quad (14)$$

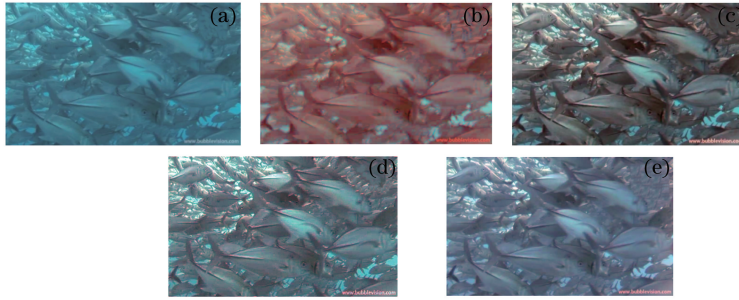


图6 水下鱼群2图像实验。(a) 原始图像；(b) MSRCR算法；(c) WCID算法；(d) JTF算法；(e) 本文算法  
Fig. 6 Image experiments of shoal 2 of fish. (a) Original image; (b) MSRCR algorithm; (c) WCID algorithm; (d) JTF algorithm; (e) proposed algorithm

式中  $I(i, j)$  表示图像  $(i, j)$  处的像素灰度值,  $\mu$  表示整幅图像像素灰度的平均值。

色彩分量相关性  $r_{\text{color}}$  表示 RGB 色彩空间的各个颜色分量之间的相关性, 反映图像内三分量灰度变化一致性,  $r_{\text{color}}$  越大, 则一幅图像色彩相关性越好。色彩分量相关性公式为

$$r_{\text{color}} = \frac{\sum_i^M \sum_j^N (X_{ij} - \bar{X})(Y_{ij} - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_i^M \sum_j^N (X_{ij} - \bar{X})^2 \sum_i^M \sum_j^N (Y_{ij} - \bar{Y})^2}}, \quad (15)$$

式中  $\bar{X}$  和  $\bar{Y}$  分别表示一幅图像中 RGB 色彩空间的任意两个颜色通道  $X$  和  $Y$  的均值,  $X_{ij}$  和  $Y_{ij}$  为图像中像素  $(i, j)$  颜色通道  $X$  和颜色通道  $Y$  的值。

色彩分量百分比表示各个颜色分量在图像中所占的比例, 反映图像的色彩均衡程度。

$$r = \frac{\bar{r}}{\bar{r} + \bar{g} + \bar{b}}, \quad g = \frac{\bar{g}}{\bar{r} + \bar{g} + \bar{b}}, \quad b = \frac{\bar{b}}{\bar{r} + \bar{g} + \bar{b}}, \quad (16)$$

式中  $\bar{r}$ 、 $\bar{g}$  和  $\bar{b}$  分别为图像中颜色分量 RGB 的均值。

根据图 4~6 对本文算法和其他算法的处理效果进行客观评价, 比较结果如表 1 所示。

表1 水下图像实验的客观评价

Table 1 Objective evaluations of underwater image experiments

Image	Evaluation index	Contrast	Color correlation			Color percentage		
			R-G	G-B	B-R	R	G	B
Single fish	Original image	14.1	0.93	0.93	0.43	0.26	0.34	0.40
	MSRCR	26.7	0.41	0.98	-0.22	0.28	0.34	0.38
	WCID	32.5	0.98	0.98	0.88	0.33	0.36	0.31
	JTF	29.5	0.66	0.98	0.19	0.28	0.33	0.39
	Proposed	35.0	0.93	0.94	0.47	0.31	0.33	0.36
Shoal 1 of fish	Original image	45.9	0.99	0.99	0.99	0.31	0.32	0.37
	MSRCR	28.7	0.99	0.99	0.97	0.29	0.35	0.36
	WCID	70.8	0.99	0.99	0.98	0.36	0.33	0.31
	JTF	71.7	0.93	0.99	0.84	0.35	0.31	0.34
	Proposed	72.3	0.98	0.99	0.99	0.36	0.32	0.32
Shoal 2 of fish	Original image	21.3	0.96	0.99	0.95	0.18	0.38	0.44
	MSRCR	23.9	0.71	0.99	0.54	0.43	0.29	0.28
	WCID	40.2	0.98	0.99	0.97	0.32	0.34	0.34
	JTF	36.7	0.88	0.99	0.88	0.29	0.34	0.37
	Proposed	45.6	0.98	0.99	0.98	0.33	0.33	0.34

从表 1 的数据可以看出, 本文算法复原图像的对比度高于 MSRCR 算法、WCID 算法和 JTF 算法的结果, 表明本文算法得出的结果图像灰度分布最好, 图像质量最高。色彩分量相关性和色彩分量百分比数据显

示,本文算法优于 MSRCR 算法和 JTF 算法,但是比 WCID 算法差,该结果表明本文算法得出的结果图像在色彩恢复处理效果上处于中间位置,而得出的图像色彩分量相关性的结果值都高于 0.8,表明色彩分量之间高度相关,在色彩分量百分比上三个分量的值都很均衡,得到的结果图像质量较好。MSRCR 算法虽然能扩大场景中的可见范围,有效地均衡图像三个分量的信息,但是所恢复的图像泛白,色彩失真严重;WCID 算法虽然能均衡图像的三分量颜色信息,但是恢复的图像整体色调偏暗;JTF 算法能有效提高图像的对比度,但是在颜色恢复上效果不佳。通过对大量的实验图像进行处理分析,综合考虑水下图像去模糊和颜色纠正,本文算法具有更好的稳健性。

## 5 结 论

因水下介质对光的散射作用和吸收作用,水下光学彩色图像存在模糊和颜色失真的问题。针对散射作用产生的模糊效果,将暗原色先验理论应用到水下图像中,并针对该理论不能很好地处理明亮区域的去模糊问题,对透射率进行优化处理;针对吸收作用产生的颜色失真,通过色温调节调整图像灰度轴的位置还原图像颜色信息。实验结果表明,相比于 MSRCR、WCID 等算法,本文算法得到的结果图像对比度更高,颜色也更均衡,为水下目标分析和识别提供了重要的信息。

## 参 考 文 献

- [1] Li Qingzhong, Ge Zhongfeng. A visibility improving algorithm based on underwater imaging model with non-uniform illumination[J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2011, 22(12): 1862-1866.  
李庆忠, 葛中峰. 基于水下光照不均匀成像模型的图像清晰化算法[J]. *光电子·激光*, 2011, 22(12): 1862-1866.
- [2] Serikawa S, Lu H. Underwater image dehazing using joint trilateral filter[J]. *Computers & Electrical Engineering*, 2014, 40(1): 41-50.
- [3] Yao Kai. Underwater multi-focus image enhancement based on wavelet[J]. *Electronic Measurement Techniques*, 2015, 38(2): 64-67.  
姚 凯. 基于小波清晰度计算的水下图像融合增强研究[J]. *电子测量技术*, 2015, 38(2): 64-67.
- [4] Xu Tingfa, Su Chang, Luo Xuan, *et al.* Underwater range-gated image denoising based on gradient and wavelet transform[J]. *Chinese Optics*, 2016, 9(3): 301-311.  
许廷发, 苏 畅, 罗 璇, 等. 基于梯度和小波变换的水下距离选通图像去噪[J]. *中国光学*, 2016, 9(3): 301-311.
- [5] Wu Yiquan, Shi Junpeng. Image enhancement in non-subsampled contourlet transform domain based on multi-scale retinex[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(3): 0310002.  
吴一全, 史骏鹏. 基于多尺度 Retinex 的非下采样 Contourlet 域图像增强[J]. *光学学报*, 2015, 35(3): 0310002.
- [6] Feng Weiyi, Chen Qian, He Weiji, *et al.* A defogging method based on hyperspectral unmixing[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(1): 0110002.  
冯维一, 陈 钱, 何伟基, 等. 基于高光谱图像混合像元分解技术的去雾方法[J]. *光学学报*, 2015, 35(1): 0110002.
- [7] Yang Miao, Ji Zhicheng. Underwater color image enhancement based on quaternion and fuzzy morphological sieves[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2012, 33(7): 1601-1605.  
杨 淼, 纪志成. 基于模糊形态筛和四元数的水下彩色图像增强[J]. *仪器仪表学报*, 2012, 33(7): 1601-1605.
- [8] Lu H, Li Y, Serikawa S. Underwater image enhancement using guided trigonometric bilateral filter and fast automatic color correction[C]. *20th IEEE International Conference on Image Processing (ICIP)*, 2013: 3412-3416.
- [9] 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.  
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.
- [10] Nie Ying, He Zhiyi. Underwater imaging and real-time optical image processing under illumination by light sources with different wavelengths[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(7): 0710002.  
聂 瑛, 何志毅. 不同波长光源照明的水下成像及光学图像实时处理[J]. *光学学报*, 2014, 34(7): 0710002.
- [11] Li Qingzhong, Liu Qing. Adaptive enhancement algorithm for low illumination images based on wavelet transform[J].

- Chinese J Lasers, 2015, 42(2): 0209001.
- 李庆忠, 刘 清. 基于小波变换的低照度图像自适应增强算法[J]. 中国激光, 2015, 42(2): 0209001.
- [12] He K, Sun J, Tang X. Single image haze removal using dark channel prior[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2011, 33(12): 2341-2353.
- [13] Schechner Y Y, Karpel N. Clear underwater vision[C]. Proceedings of Computer Vision & Pattern Recognition, 2004, I: 536-543.
- [14] He K, Sun J, Tang X. Guided image filtering[C]. European Conference on Computer Vision, 2010: 1-14.
- [15] Wang Jian, Pang Yanwei, Yu Hao. Gray-axis alignment based automatic white balance for color images[J]. Journal of Tianjin University, 2010, 43(6): 479-484.
- 王 建, 庞彦伟, 俞 浩. 基于灰轴调整的彩色图像自动白平衡[J]. 天津大学学报, 2010, 43(6): 479-484.
- [16] Pan Yunhe, Dong Jinxiang, Chen Deren. Computer graphics——principles, methods and applications[M]. Beijing: Higher Education Press, 2003.
- 潘云鹤, 董金祥, 陈德人. 计算机图形学——原理, 方法及应用[M]. 北京: 高等教育出版社, 2003.
- [17] 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.
- [18] Chiang J Y, Chen Y C. Underwater image enhancement by wavelength compensation and dehazing [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2012, 12(4): 1756-1769.