

文章编号: 2095-2163(2020)06-0074-06

中图分类号: TP391.41

文献标志码: A

# 基于 MSRCR 的水下图像增强算法研究

王浩然<sup>1</sup>, 余粟<sup>2</sup>, 燕雨薇<sup>1</sup>

(1 上海工程技术大学 电子电气工程学院, 上海 201620; 2 上海工程技术大学 第二图文信息中心, 上海 201620)

**摘要:** 针对水下彩色图像存在的颜色失真、对比度低问题, 提出一种基于 MSRCR 的水下图像增强方法。首先, 用 MSRCR 算法预处理初始图像削弱原图失真程度; 然后, 采用直方图拉伸拓宽预处理图像灰度级分布提高图像对比度; 再通过伽马变换, 突显图像细节的同时对图像颜色进行还原; 最后进行引导滤波去噪平滑图像、保持图像边界。实验结果表明, 经所提算法处理后的图像对比度明显提高, 水下色彩失真问题得以解决。相比其他算法, 该算法具有更好的稳健性。

**关键词:** MSRCR 算法; 直方图拉伸; 伽马变换; 引导滤波

## Research on underwater image enhancement based on improved msrcr algorithm

WANG Haoran<sup>1</sup>, YU Su<sup>2</sup>, YAN Yuwei<sup>1</sup>

(1 School of Electric and Electronic Engineering Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China;

2 Second Graphic Information Center Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

**[Abstract]** Aiming at the problems of color distortion and low contrast in underwater color image, an underwater image enhancement method based on msrcr is proposed. First, msrcr algorithm is used to preprocess the initial image to reduce the distortion of the original image; Then, improving image contrast by expanding gray level distribution of preprocessed image with the histogram stretching; Moreover, the gamma transformation is used to highlight the details of the image and restore the color of the image; Last, the guided filter is used to smooth the image and maintain the image boundary. The experimental results show that the contrast of the image processed by this algorithm is obviously improved, and the problem of underwater color distortion is solved. Compared with other algorithms, this algorithm has better robustness.

**[Key words]** MSRCR algorithm; histogram stretching; gamma transformation; guided filter

## 0 引言

中国海域辽阔, 拥有约 300 万平方公里的海洋国土面积。近年来深海信息技术迅猛发展, 海洋资源的勘探和利用对我国的国民经济和国防安全愈发重要。但是恶劣的水下光学成像环境导致获取到的水下图像广泛存在对比度低、模糊、偏色等问题, 严重阻碍了水下活动的正常进行<sup>[1]</sup>。目前 Retinex 算法及其衍生的单尺度、多尺度 Retinex 算法和 MSRCR 算法广泛用于图像增强, 但是处理后的水下图像仍存在一定失真。文献[2]先通过大气光暗原色先验去雾算法提高水下图像清晰度, 再通过透射率自适应调节提高图像清晰度, 但是处理后的图像整体偏暗。文献[3]提出了基于模糊形态和四元数的水下彩色图像增强方法, 但是处理后的图像对比度不高。文献[4]提出了基于多尺度 Retinex 的非下采样 Contourlet 域图像增强方法, 但是处理后的图像色彩失真。

针对上述问题提出了一种基于 MSRCR 的水下图像增强算法。首先经 MSRCR 算法对水下图像进行预处理, 改善水下图像偏蓝绿色彩失真状况; 然后

经直方图拉伸拓展预处理后图像的灰度分布, 提高对比度; 再对图像进行伽马变换突显细节; 最后采用引导滤波对图像平滑去噪。

## 1 Retinex 理论及 MSRCR 算法

Retinex 是视网膜 (retina) 和皮层 (cortex) 两个单词的合成, 所以 Retinex 理论也被称为视网膜皮层理论。该理论的基本思想是光照强度决定原始图像像素动态范围, 而原始图像的固有属性则由物体自身的反射系数决定, 即原始图像为反射图像和光照图像乘积。因此 Retinex 理论本质就是去除光照影响, 保留住物体的固有属性。假设观察者观察的图像为  $I(x, y)$ , 则表达式为:

$$I(x, y) = L(x, y) \times R(x, y). \quad (1)$$

式中:  $L(x, y)$  表示光照分量,  $R(x, y)$  表示物体本身固有性质的反射分量。对公式(1)两边做对数处理:

$$\begin{aligned} \log(I(x, y)) &= \log(L(x, y) \times R(x, y)) = \\ &= \log(L(x, y)) + \log(R(x, y)). \end{aligned} \quad (2)$$

**作者简介:** 王浩然(1996-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 图像增强; 余粟(1962-), 女, 硕士, 教授, 主要研究方向: 数字图像处理及计算机仿真应用研究; 燕雨薇(1995-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向: 计算机应用技术。

收稿日期: 2020-03-26

令  $i(x, y) = \log(I(x, y))$ ,  $r(x, y) = \log(R(x, y))$ ,  $l(x, y) = \log(L(x, y))$ , 那么

$$i(x, y) = l(x, y) + r(x, y). \quad (3)$$

上面作对数处理的两大好处是:(1)人眼对亮度的感知能力近似于对数曲线不是线性的;(2)复杂的乘除在对数域中是简单的加减法,可以大幅度降低算法的复杂度。MSRCR 算法是 Retinex 的一种,因为 SSR<sup>[5]</sup>和 MSR<sup>[6]</sup>算法易产生色差,所以研究者们又提出了新的算法,即带颜色恢复的多尺度 Retinex(MSRCR)算法。MSRCR 的数学表达式为:

$$r_i = G(C_i(x, y) (\sum_{k=1}^N w_k (\log I_i(x, y) - \log(F_k(x, y) * I_i(x, y)))) + t). \quad (4)$$

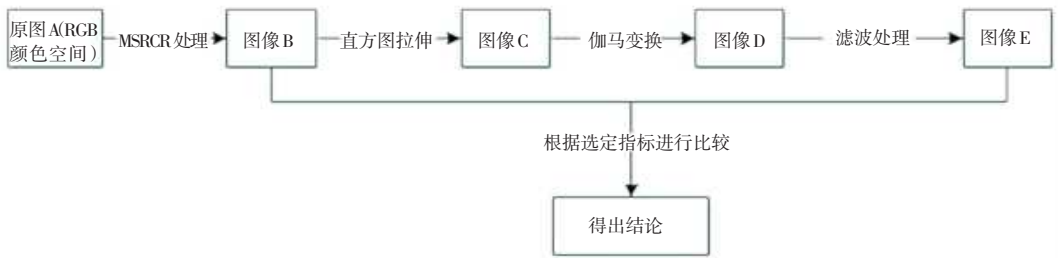


图 1 算法流程图

Fig. 1 Algorithm flow chart

具体步骤为:(1)输入水下彩色图像 A 先经过 MSRCR 算法预处理,得到图像 B;(2)对图像 B 进行直方图拉伸处理即拓宽图 B 的灰度级分布范围,使图像层次分明从而得到图像 C;(3)对图像 C 进行伽马变换得到图像 D,进一步提高图像对比度和整体亮度;(4)对图像 D 进行滤波去噪得到最终图像 E,去噪后图像更加清晰;(5)最后,用 4 种指标对图像 B 和图像 E 进行比较,得出结论。

### 2.1 直方图拉伸

直方图拉伸的作用是扩展图像灰度分布,提高图像对比度。图 2 为实验图水下人与铜像经拉伸前后直方图对比。由图可知,直方图拉伸可以使得图像灰度级分布更加均匀,把原本密集的灰度级分布展开。

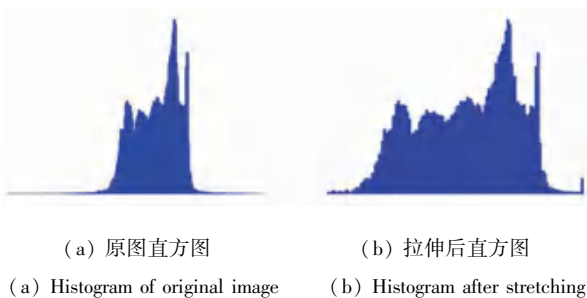


图 2 水下人与铜像直方图

Fig. 2 Comparison of underwater man and copper image histogram

其中,  $G$  和  $t$  分别是增益和偏移量系数,作用是较好地将图像显示在屏幕中; $C_i(x, y)$  是  $i(i \in \{r, g, b\})$  颜色通道的恢复因子; $w_k$  是第  $k$  个尺度加权权重系数,它需要满足  $\sum_{k=1}^N w_k = 1$ ;  $F_k(x, y)$  是在第  $k$  个尺度上的高斯滤波函数。

### 2 水下图像增强方法

就水下图像易出现的色彩失真、对比度不高问题,提出基于 MSRCR 的水下图像增强方法。经本算法处理后的水下图像对比度、清晰度都得到大幅提高、图像层次分明以及处理后的图像色彩恢复效果也更好。本文算法流程如图 1 示。

图 3 为水下人与铜像灰度图,从图 3 可以看到,拉伸后的灰度图像 b 比拉伸前原图灰度图更清晰同时亮度也得到一定提高。



(a) 原图灰度图 (b) 拉伸后图像灰度图

(a) Grayscale image of original image (b) Grayscale image of stretched image

图 3 水下人与铜像灰度图

Fig. 3 Underwater man and grayscale of bronze image

### 2.2 伽马变换

虽然拉伸后图像灰度图比原来图像灰度图更清晰,因为从图 2 可以看到,经拉伸后图像直方图分布范围更广,灰度值更加均匀,但是从图 3(b) 可以看出,经拉伸后的图像灰度图层次不显著,对比度仍有较大提高空间。因此,在直方图拉伸后,使用伽马变换来进一步提升图像对比度,使得图像更有层次感。图像伽马变换的基本形式为:

$$s = cr^\gamma. \quad (5)$$

在此假定  $c = 1$ ,得到不同  $\gamma$  值的伽马曲线,如图

4所示。

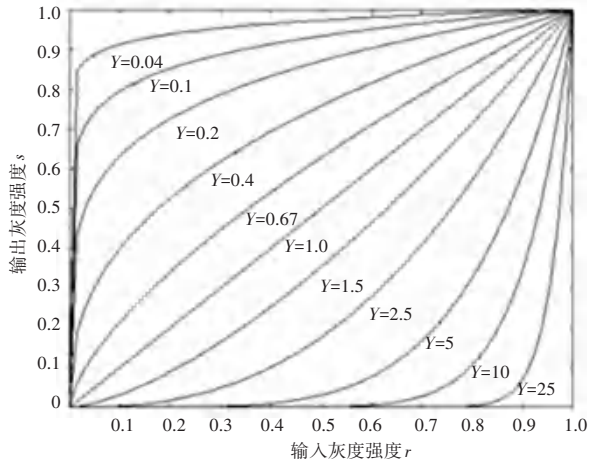


图4 伽马曲线

Fig. 4 Gamma curve

伽马变换的作用是增强图像灰度值,增加图像对比度。由图可知,如果图像整体偏暗,就选择  $\gamma < 1$ ,可以增强图像亮度;反之,如果图像整体灰度偏亮时,则选择  $\gamma > 1$ ,可以使图像变暗、突显图像细节以及提高图像对比度。在本研究中为了得到最优的伽马变换结果,经反复测试最终选取伽马值为2。图5为经过伽马变换后的图像。



图5 伽马变换后的图像

Fig. 5 Image after gamma transform

与图3(b)相比,经伽马变换后的图像局部亮度和对比度都有所提高。但图5还有一些噪声信号,使得图像看起来模糊。故本文引入滤波方法来去噪。

### 2.3 滤波处理

引导滤波器(guided image filter)<sup>[7]</sup>和双边滤波器(bilateral filter)<sup>[8]</sup>在滤波过程中都能够有效保留图像中边缘信息,所以又称为保边滤波器(edge preserving filter)。鉴于引导滤波在写出时间复杂度与窗口大小无关算法方面比双边滤波更有优势以及引导滤波使用大窗口处理图片时,效率更高,故本文选用引导滤波对伽马变换后的图像进行去噪。

假设  $p$  为输入图像,  $q$  为输出图像,  $I$  为引导图,  $q$

与  $I$  在以像素  $k$  为中心的窗口中具有局部线性关系:

$$q_i = a_k I_i + b_k, \quad \forall i \in w_k. \quad (6)$$

其中,  $q$  是输出像素值,  $I$  是输入像素值,  $i$  和  $k$  是像素索引,  $a$  和  $b$  是当窗口中心位于  $k$  时此线性函数的系数。这个模型保证了只有在  $I$  存在边缘的情况下,  $q$  才会存在边缘。这是因为:  $\nabla q = a \nabla I$ 。  $q$  即  $p$  去除噪声或者纹理之后的图像:

$$q_i = p_i - n_i. \quad (7)$$

为确定以上公式中的线性系数,并使得  $q$  与  $p$  的差别最小,转化为最优化问题:

$$E(a_k, b_k) = \sum_{i \in w_k} ((a_k I_i + b_k - p_i)^2 + \varepsilon a_k^2). \quad (8)$$

其中,  $p$  是待滤波图像,  $\varepsilon$  是对过大  $a$  值进行惩罚的正则系数。通过最小二乘法,我们可以得到:

$$a_k = \frac{1}{|w|} \frac{\sum_{i \in w_k} I_i p_i - \mu_k \bar{p}_k}{\sigma_k^2 + \varepsilon}, \quad (9)$$

$$b_k = \bar{p} - a_k \mu_k. \quad (10)$$

其中,  $\mu_k$  是引导图  $I$  在窗口  $w_k$  中的平均值,  $\sigma_k^2$  是引导图  $I$  在窗口  $w_k$  中的方差,  $|w|$  是窗口  $w_k$  中像素总数量,  $\bar{p}$  是待滤波图像  $p$  在窗口  $w_k$  中的均值。

最后输出图像数学表达式为:

$$q_i = \frac{1}{|w|} \sum_{k: i \in w_k} (a_k I_i + b_k) = \bar{a}_i I_i + \bar{b}_i. \quad (11)$$

其中,  $w_k$  是所有包含像素  $i$  的窗口,  $k$  是其中心位置。引导滤波结果如图6所示。与图5相比,经滤波处理后的图像更加平滑,整体亮度也更高,对比度进一步提高,这就是所提算法的最终处理结果。



图6 引导滤波处理后图像

Fig. 6 Image after guided filtering

### 3 实验与分析

为了验证本文算法的有效性,从百度水下图像库中选取多幅不同场景的水下图像进行增强处理,选取3组不同光衰减性、后向散射性和不同浑浊程度的水下彩色图像进行分析,给出水下彩色图像的初步处理成果并与多尺度 Retinex 算法(MSR算法)<sup>[9]</sup>、带色彩恢复的 MSR 算法(MSRCR算法)<sup>[6]</sup>

进行比较,本实验软件平台为 MatlabR2018b。

### 3.1 实验结果对比

下面的图 7~9 是经过 MSR 算法、MSRCR 算法和本文所提算法对水下人与铜像、水下鱼群 1 和 2 的处理结果。

图 7(b)、7(c) 分别经过 MSR 算法、MSRCR 算法及进行处理。图 7(b) 和原图相比,消除了原图严重的偏绿色失真,但是对比度不高,而且图中目标也不清晰;图 7(c) 和原图相比,也对原图严重的色彩失真进行了抑制,效果比图 7(b) 稍好,但是仍然存在对比度低、目标不清晰问题;图 7(d) 是经过本文所提算法处理的结果,与 7(b)、7(c) 相比,人和铜像看起来更加清晰,图像整体亮度更高、对比度也大幅提升,噪声也得到了有效的抑制,图像色彩也更加

丰富了。

图 8 中 MSR 算法处理的结果虽然消除了原图的偏蓝色失真,但是引入了新的颜色失真,图像整体偏暗;经 MSRCR 算法处理的结果,虽然鱼的形态清晰一些,但图像整体还是偏暗,而且图像颜色也出现了新的色彩失真;经本文算法处理的图 7(d),鱼的形态很容易和背景分离,图像整体对比度和清晰度高,色彩也更加正常。

图 9 中,经过 MSR、MSRCR 算法处理的图 7(b)、7(c) 消除了原图 7(a) 的颜色失真,但是整幅图存在对比度不高、模糊问题;相反,本文算法处理的图 7(d) 整体对比度更高、图像更加平滑,可以轻易区别鱼和背景,颜色也更加鲜艳。总之,直观感觉本文算法要优于 MSR、MSRCR 算法的表现。

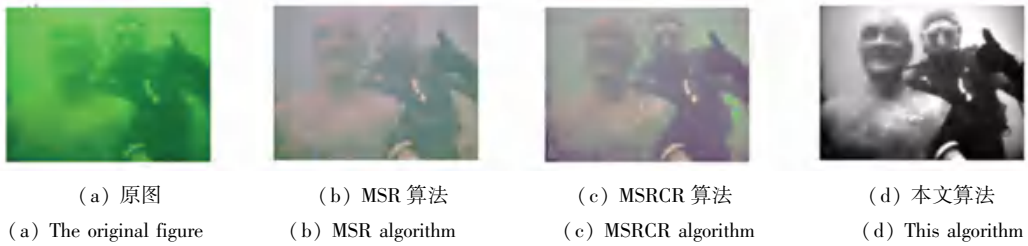


图 7 水下人与铜像

Fig. 7 Underwater man and bronze statue

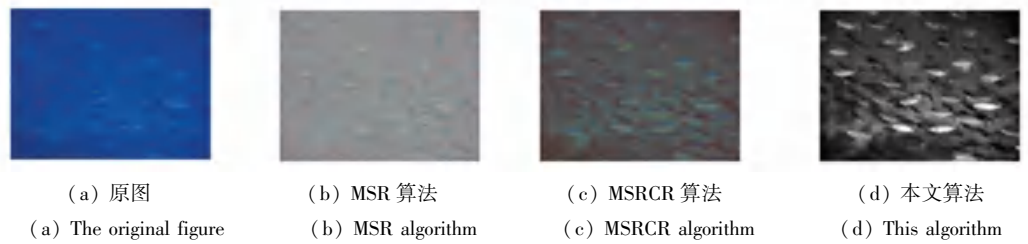


图 8 水下鱼群 1

Fig. 8 Underwater fish group 1

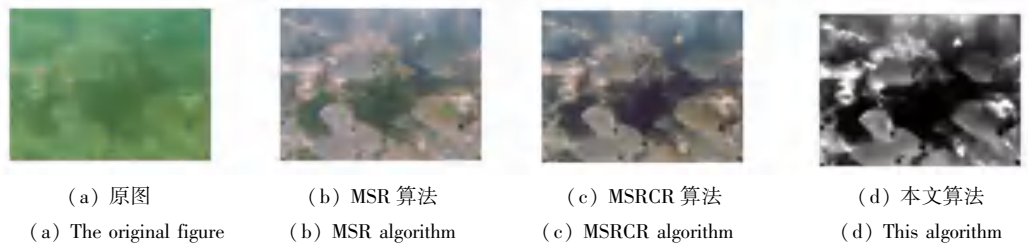


图 9 水下鱼群 2

Fig. 9 Underwater fish group 2

### 3.2 实验数据对比

为了进一步说明实验结果,本文选择信息熵、对比度<sup>[10]</sup>、均方差、峰值信噪比<sup>[11]</sup> 4 个指标对图像增强效果进行评价。

峰值信噪比 PSNR (peak signal-to-noise ratio)

即峰值信号与噪声信号的平均能量之比,是衡量图像质量的重要指标之一。要计算 PSNR 必须先计算 MSE (均方误差),MSE 是一种常见的损失函数。设两幅  $m \times n$  的单色图像  $I$  和  $K$ ,若一个为另外一个近似噪声,则它们的均方误差可以定义为:



$$MSE = \frac{1}{mn} \sum_{i=0}^{m-1} \sum_{j=0}^{n-1} [I(i,j) - K(i,j)]^2. \quad (12)$$

PSNR 通过 MSE 得出来的,公式为:

$$PSNR = 10 \cdot \log_{10} \frac{MAX_I \delta}{MSE} = 20 \cdot \log_{10} \frac{MAX_I \delta}{\sqrt{MSE}}. \quad (13)$$

其中,  $MAX_I$  表示图像颜色的最大灰度值,其值最大为 255。由式(12)、(13) 可得  $MSE$  越小,  $PSNR$  越大,而且  $PSNR$  越大,代表着图像质量越好。

图像熵是图像特征统计的一种数学表示,它体现出图像平均信息量的大小。图像的一维熵定义是:图像中灰度分布特征聚集信息量的多少,用  $p_i$  表示图像中灰度值为  $i$  的像素所占图像总像素的比例,则灰度图像的一元熵定义为:

$$H = - \sum_{i=0}^{255} p_i \log p_i. \quad (14)$$

表 1 水下图像增强实验数据

Tab. 1 Experimental data of underwater image enhancement

图像	算法	信息熵	对比度	均方差	峰值信噪比
水下人与铜像	原图	6.918 8	15.270 6	—	—
	MSR 算法	7.074 0	28.498 2	6.119 7	16.198 1
	MSRCR 算法	7.304 1	31.584 5	5.983 2	16.296 1
	本文算法	7.900 3	58.038 7	5.494 9	16.666 0
水下鱼群 1	原图	4.811 4	10.068 3	—	—
	MSR 算法	5.010 3	39.511 6	4.455 5	17.576 4
	MSRCR 算法	5.804 6	57.084 8	2.836 7	19.537 3
	本文算法	6.977 3	77.005 0	1.006 4	24.037 7
水下鱼群 2	原图	5.882 7	5.511 1	—	—
	MSR 算法	6.638 6	25.702 1	12.683 1	13.033 1
	MSRCR 算法	6.976 4	37.574 0	12.404 4	13.129 6
	本文算法	7.697 8	92.908 8	5.715 4	16.494 9

如表 1 所示,本文算法处理后的图像:信息熵最大,说明算法对原图细节信息具有最好的保留效果;对比度最高,本文算法有效改善了原水下图像的低对比度和低清晰度;峰值信噪比最高,说明了水下图像经本文算法处理后有效信息最多以及对噪声信号进行了最大的抑制。总而言之,本文算法无论从直观结果还是从客观数据上,对水下彩色图像处理的效果都优于 MSR 和 MSRCR 算法。

#### 4 结束语

Retinex 理论自问世以来普遍用于图像去雾增强,后来又发展出多尺度视网膜算法(MSR)和带色彩恢复视网膜算法(MSRCR)等。本文基于 MSRCR

其中,  $p_i$  是某个灰度在该图像中出现的概率,可由灰度直方图获得。

对比度就是图像黑与白的比值,即图像从黑到白的渐变等级。对比度越大,图像从黑到白的渐变层次就越多,故表现出的色彩越丰富。

对比度的计算公式如下:

$$C = \sum_{\delta} \delta(i,j)^2 P_{\delta}(i,j). \quad (15)$$

其中,  $\delta(i,j) = |i - j|$ , 即相邻像素间灰度差,实际实现中取四近邻或八近邻灰度差;  $P_{\delta}(i - j)$  为相邻像素间灰度差为  $\delta$  的像素分布概率。综上,处理后的最佳图像应该具有高熵值、高对比度、低均方误差和高信噪比。

上面是 4 种评价指标的理论陈述,4 种评价指标的结果如表 1 所示。

算法提出了新的水下图像增强方法,所提算法中直方图拉伸将 MSRCR 预处理图像的灰度图进行了扩展,而不是仅局限于中间范围,使图像层次分明;伽马变换使得直方图拉伸后图像的对比度和亮度得到增强;最后,虽然引导滤波和双边滤波具有相似保边功能,但是引导滤波可以大大降低运算时间复杂度以及降低计算机运行时间而最终被选择,经滤波处理的最终图像整体更加平滑。

本文算法处理的水下图像对比度和清晰度上都有很大提高、图像色彩失真得到最大的消除以及对原图的噪声进行了显著抑制,提高了图像质量。当  
(下转第 85 页)