

引用格式:王红茹,张玲,王佳,等.基于改进的同态滤波和 Retinex 的水下图像增强的算法研究[J].电光与控制,2021,28(5):32-35. WANG H R, ZHANG L, WANG J, et al. An underwater image enhancement algorithm based on improved homomorphic filtering and Retinex[J]. Electronics Optics & Control, 2021, 28(5):32-35.

# 基于改进的同态滤波和 Retinex 的水下图像增强的算法研究

王红茹<sup>a,b</sup>, 张玲<sup>a</sup>, 王佳<sup>a,b</sup>, 卢道华<sup>a,b,c</sup>

(江苏科技大学, a. 机械工程学院; b. 江苏省船海机械先进制造及工艺重点实验室;  
c. 海洋装备研究院, 江苏 镇江 212003)

**摘要:**光在水下传播受到微粒和水吸收作用的影响,导致水下图像对比度低,含有噪声且存在颜色偏差。针对传统的同态滤波算法增强后的图像还存在雾状模糊且颜色偏暗的问题,提出改进的同态滤波与 Retinex 多尺度融合的水下图像增强算法。该算法首先用基于双边滤波的单尺度 Retinex 算法对原始图像进行颜色校正;然后对修正后的图像构造相应的 Butterworth 陷波滤波器进行滤波;最后对颜色修正后的图像和同态滤波增强后的图像进行多尺度融合。通过实验可得,该方法能够有效地改善色偏,提高图像的清晰度。

**关键词:**水下图像增强;颜色校正;同态滤波;单尺度 Retinex;图像融合

中图分类号: TP391 文献标志码: A doi:10.3969/j.issn.1671-637X.2021.05.008

## An Underwater Image Enhancement Algorithm Based on Improved Homomorphic Filtering and Retinex

WANG Hongru<sup>a,b</sup>, ZHANG Ling<sup>a</sup>, WANG Jia<sup>a,b</sup>, LU Daohua<sup>a,b,c</sup>

(Jiangsu University of Science and Technology, a. School of Mechanical Engineering; b. Key Laboratory of Advanced Manufacture and Process for Marine Mechanical Equipment Research Institute; c. Marine Equipment Research Institute, Zhenjiang 212003, China)

**Abstract:** The light propagation under water is influenced by the absorption of water and particles, which may result in low contrast, noise, and color deviation of underwater images. Aiming at the problem that the enhanced image of the traditional homomorphic filtering algorithm still has foggy blur and dark color, an improved underwater image enhancement algorithm is proposed, which fuses the improved homomorphic filtering with multi-scale Retinex. Firstly, the single-scale Retinex algorithm based on bilateral filtering is used to correct the color of the original image. Then, the modified image is filtered by constructing a corresponding Butterworth notch filter. Finally, the image enhanced by homomorphic filtering and the image after color modification are fused at multiple scales. Experimental results show that this method can effectively suppress color offset and improve image resolution.

**Key words:** underwater image enhancement; color correction; homomorphic filtering; single-scale Retinex; image fusion

### 0 引言

我国是海洋大国,对海洋资源的开发与利用已逐渐成为我国可持续发展的重要保证。但是由于水下微粒物的存在,以及光的散射和吸收,图像往往具有很低

的对比度,而特征提取和目标识别需要图像的详细信息,因此水下图像增强具有重要意义。

目前国内外很多专家学者提出了关于水下的图像增强方法<sup>[1-3]</sup>。JOBSON等<sup>[4]</sup>基于同态滤波提出的 Retinex 算法,虽然能够突出有用信息,但是不能兼顾动态范围压缩和颜色重现,而且会出现光晕伪影;JI等<sup>[5]</sup>提出的同态滤波算法主要对原图像的高频信号区域进行增强,得到较为清晰的图像,但该图像不符合人类视觉系统,处理后的图像会出现颜色失真的情况;LEI等<sup>[6]</sup>提出了改进的多尺度 Retinex 水下彩色图像的复原方

收稿日期:2020-03-03

修回日期:2021-04-08

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2018YFC0309100)

作者简介:王红茹(1979—),女,江苏镇江人,博士,副教授,硕士,研究方向为智能机器人。

法,对图像的色彩失真起到了很大的作用,但是该方法亮度变化大,容易造成伪影使得图像细节模糊。

针对以上提出的产生伪影、细节边缘被模糊,本文结合同态滤波与 Retinex 算法原理,提出一种既能修正图像颜色,又能增强图像边缘与细节的新方法。首先,运用基于双边滤波的单尺度 Retinex 算法估算出图像的反射分量,对 R 通道进行颜色修正,再根据颜色衰减系数比得出 G 通道和 B 通道的颜色校正,从而得到校正后的图像;对校正后的图像使用以 Butterworth 陷波滤波器的同态滤波对图像的高频线条的细节和边缘处进行增强,对低频部分进行抑制,得到增强后的图像;最后运用拉普拉斯金字塔法融合颜色校正后的图像和增强后的图像。

## 1 基于双边滤波的 Retinex 算法的颜色校正

相机采集到的图像往往由红(R)、绿(G)、蓝(B)三色构成,由于不同波长的光线在水中传播时,红色的衰减程度最高,而蓝绿色的衰减程度较低,水下图像往往会存在颜色失真,图像会呈现偏蓝绿色,因此需要对原图像进行颜色校正。本文选用 Retinex 算法<sup>[7]</sup>结合 R,G,B 这 3 个通道的颜色衰减系数对增强后的图像进行颜色校正,将处理后的图像  $S(x,y)$  看成是环境光的照射分量  $L(x,y)$  和图像细节信息的目标物体的反射分量  $R(x,y)$  的乘积,则有

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

将式(1)两边取对数,然后将图像的 R,G,B 这 3 个通道的像素分别进行对数域的处理,即

$$r_i(x,y) = \text{lb } R_i(x,y) = \text{lb } S_i(x,y) - \text{lb}(F(x,y) * S_i(x,y)) \quad (2)$$

式中:  $F(x,y)$  为高斯滤波;  $*$  为卷积运算;  $i \in \{R,G,B\}$ 。

但是运用高斯滤波处理后的图像会产生光晕,并且边缘模糊,本文将高斯滤波改为双边滤波,估计出图像的反射分量。双边滤波器运算简单,且能够有效地保留图像的细节,并保持边缘不被模糊。则

$$r_i(x,y) = \text{lb } R_i(x,y) = \text{lb } S_i(x,y) - \text{lb}(W_i(x,y,x',y')S_i(x,y)) \quad (3)$$

$W_i(x,y,x',y')$  =

$$\exp\left(-\frac{(x-x')^2 + (y-y')^2}{2\sigma_d^2} - \frac{\|I(x,y) - I(x',y')\|^2}{2\sigma_r^2}\right) \quad (4)$$

式中:  $S_i(x,y)$  为原始图像;  $W_i(x,y,x',y')$  是中心环绕函数;  $\sigma_d$  和  $\sigma_r$  为平滑参数;  $(x',y')$  为图像中心位置;  $I(x,y)$  和  $I(x',y')$  分别为像素  $(x,y)$  和  $(x',y')$  的强度。

本文先运用式(3)求出  $r_R(x,y)$ ,再根据 3 个颜色通道的衰减系数比计算出  $r_B(x,y)$  和  $r_G(x,y)$ ,有

$$\begin{cases} r_B(x,y) = r_R(x,y) \frac{c_B}{c_R} \\ r_G(x,y) = r_R(x,y) \frac{c_G}{c_R} \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $r_R(x,y)$ ,  $r_G(x,y)$ ,  $r_B(x,y)$  分别为 R,G,B 这 3 个通道的像素进行对数域的处理结果;  $c_R, c_G, c_B$  分别为 R,G,B 这 3 个通道的衰减系数。

由于  $r_i(x,y)$  属于对数域,因此要转化成实数域,从而求得  $R_i(x,y)$ ,再进行颜色通道重组,最后输出反射分量  $R(x,y)$ 。

## 2 基于改进同态滤波的图像增强

经颜色校正后的图像存在边缘模糊、细节不清晰、对比度低等特点,因此需要对校正后的图像进行图像增强,本文选择改进的同态滤波实现增强算法。

滤波器在同态滤波算法中起着关键性作用,不同的滤波器选择会产生不一样的图像效果<sup>[8]</sup>。常用的水下滤波器使用的是 Butterworth 高通滤波器。则

$$H(u,v) = (\gamma_H - \gamma_L) [1/(1 + cD_0/D(u,v))]^{2n} + \gamma_L \quad (6)$$

式中:  $\gamma_H$  为高频增益,  $\gamma_L$  为低频增益,如果  $\gamma_H > 1$  且  $\gamma_L < 1$ ,则滤波器函数具有衰减低频、增强高频部分的作用;  $c$  为锐化系数;  $D_0$  为截止频率,是一个正常数;  $D(u,v)$  为频率域中点  $(u,v)$  与频率矩阵中心  $(u_0, v_0)$  的距离,即

$$D(u,v) = [(u - u_0)^2 + (v - v_0)^2]^{1/2} \quad (7)$$

文献[8]方法不能很好地将高频和低频进行分开处理,从而使得增强效果不明显,且存在雾状模糊、中间亮、两边暗的现象;而陷波滤波器可以很好地滤除背景噪声等低频信号,更好地增强边缘细节等高频信号,由此构造一个中心频率被平移到高频频谱所在的中心区域的陷波滤波器。改进后的 Butterworth 陷波滤波函数  $H(u,v)$  为

$$H(u,v) = (\gamma_H - \gamma_L)(H_{NR}(u,v) + H_{NP}(u,v)) + \gamma_L \quad (8)$$

$$\begin{cases} H_{NR}(u,v) = \prod_{k=1}^3 [1/(1 + cD_0/D_k(u,v))^{2n}] \cdot [1/(1 + cD_0/D_{-k}(u,v))^{2n}] \\ H_{NP}(u,v) = \prod_{k=1}^3 [1/(1 + D_k(u,v)/D_0)^{2n}] \cdot [1/(1 + D_{-k}(u,v)/cD_0)^{2n}] \end{cases} \quad (9)$$

式中:  $H_{NR}(u,v)$  表示带阻滤波器;  $H_{NP}(u,v)$  表示相应的带通滤波器。

距离计算

$$\begin{cases} D_k(u,v) = [(u - M/2 - u_k)^2 + (v - N/2 - v_k)^2]^{1/2} \\ D_{-k}(u,v) = [(u - M/2 + u_k)^2 + (v - N/2 + v_k)^2]^{1/2} \end{cases} \quad (10)$$

式中,  $(u_k, v_k)$  为滤波器的中心, 由频率矩形中心  $(M/2, N/2)$  确定得到。

图 1 所示为改进的同态滤波的频谱图对比。

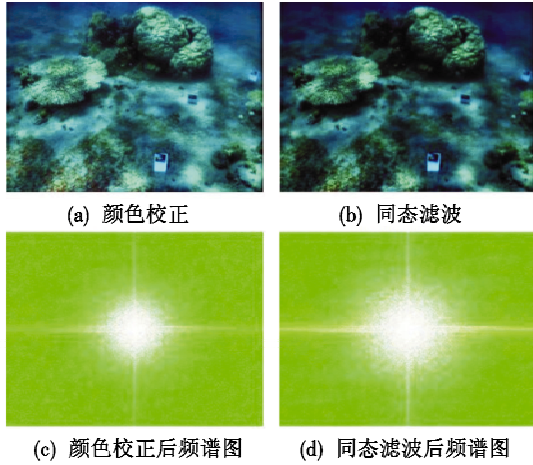


图 1 滤波前后频谱对比图

Fig. 1 Spectrograms of filtered image and original image

### 3 基于多尺度的图像融合

本文将原始图像分别经过 Retinex 颜色校正和经过同态滤波增强后得到的图像作为多尺度融合的输入图像, 从而使得到的图像具有更好的细节信息。本文主要考虑用饱和度、色度、局部对比度 3 个特征定义输入图像的权重图。

饱和度权重使图片达到融合后饱和度均匀, 从而调整原图像的高度饱和区<sup>[9]</sup>。饱和度权重为

$$W_{s,k}(x,y) = \left( \frac{(R_k(x,y) - L_k(x,y))^2 + (G_k(x,y) - L_k(x,y))^2 + (B_k(x,y) - L_k(x,y))^2}{3} \right)^{1/2} \quad (11)$$

式中:  $L_k(x,y)$  为第  $k$  张图片的灰度图;  $R_k(x,y)$ ,  $G_k(x,y)$ ,  $B_k(x,y)$  分别为第  $k$  张图片的红色、绿色、蓝色通道。

色度权重与图像的饱和度有关, 饱和度越大, 图像的质量越好, 色彩越明亮。色度权重为

$$W_{b,k}(x,y) = \exp\left(-\frac{(L_k(x,y) - 0.5)^2}{2 \times 0.25^2}\right) \quad (12)$$

局部对比度权重是指图像中像素点与其所在区域的平均像素值的关系, 从局部对比度的值可以看出图像中的过亮和过暗的区域。局部对比度权重为

$$W_{c,k}(x,y) = \|I^k(x,y) - I_{whc}^k(x,y)\| \quad (13)$$

式中:  $I^k(x,y)$  为第  $k$  张图片的亮通道图;  $I_{whc}^k(x,y)$  为低通道滤波之后的像素值。

在实际应用中需要将饱和度权重、色度权重和局部对比度权重 3 个权重图进行归一化, 即

$$\bar{W}_k(x,y) = \frac{W_{s,k}(x,y) + W_{c,k}(x,y) + W_{b,k}(x,y)}{\sum_k W_k(x,y)} \quad (14)$$

本文采用拉普拉斯金字塔<sup>[10]</sup>将校正后的图像和增强后的图像分解为多尺度的拉普拉斯金字塔, 然后在高斯滤波算子的基础上, 将权重图分解为高斯金字塔, 最后通过逐层重建的方法获得融合后的图像。融合算式为

$$F_l(x,y) = \sum_k L_l[I_k(x,y)]G_l[\bar{W}_k(x,y)] \quad (15)$$

式中:  $F_l(x,y)$  为最后的输出金字塔图像;  $L_l[I_k(x,y)]$  为将  $k$  个进行融合的图像进行层数为  $l$  的拉普拉斯金字塔分解;  $G_l[\bar{W}_k(x,y)]$  为对权重图进行高斯金字塔分解。

### 4 本文算法流程

本文的算法流程如图 2 所示。

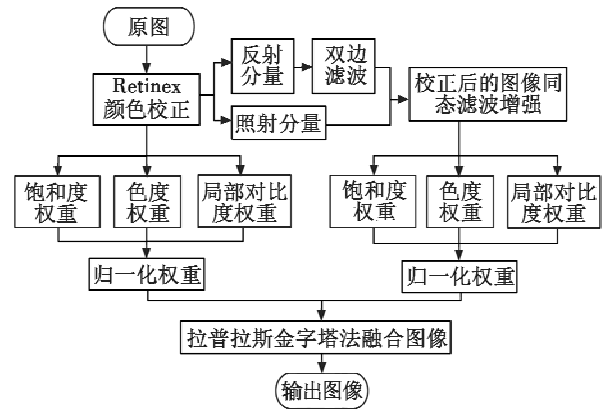


图 2 算法流程图

Fig. 2 Flow chart of the proposed algorithm

首先将原始图像用单尺度 Retinex 分解成反射分量和照射分量, 运用双边滤波对反射分量进行处理, 得到颜色校正后的图像; 然后对校正后的图像进行 Butterworth 陷波滤波器滤波, 得到增强后的图像; 最后将 2 张图片进行融合, 得到清晰的图像。

### 5 实验分析

本文在 Windows10 平台上使用 Matlab2015a 对各个算法进行处理结果对比。实验采用 3 幅水下原始图像, 5 种算法实验对比如图 3 所示。图 3 中自上而下依次为原始图像及其用直方图均衡化算法 (HE)<sup>[11]</sup>、基于暗原色先验算法 (DCP)<sup>[12]</sup>、带色彩恢复的多尺度视网膜增强算法 (MSRCR)<sup>[13]</sup>、同态滤波算法 (HF)<sup>[8]</sup> 和本文提出的图像增强算法的图像增强结果。

从图 3 中可以看出: HE 算法虽然对图像有增强作用, 但是图像有明显的失真现象; DCP 算法不能很好地区分前景和背景, 而且也不能解决图像色偏的问题; MSRCR 算法图像边缘细节模糊; HF 算法增强了图像的边缘与细节, 但是不能解决图像色偏问题。而本文算法有效地增强了图像的边缘和细节, 而且对水下图像的颜色也进

行了有效校正。



图3 5种算法的实验对比

Fig. 3 Experimental comparison of the 5 algorithms

以上分析是针对本文算法进行的主观分析。为了验证本文算法的有效性,将从平均梯度、信息熵2个方向客观地评价图像质量,分析结果如表1、表2所示。

表1 图像平均梯度比较

Table 1 Average gradient of images

	平均梯度		
	场景1	场景2	场景3
原图	2.2682	2.4148	1.3486
HE	6.3789	5.5864	2.1618
DCP	2.3872	2.4063	1.5866
MSRCR	2.7095	3.2548	1.3680
HF	1.4705	2.0357	1.4705
本文	7.9661	7.8283	4.8942

表2 图像信息熵比较

Table 2 Information entropy of images

	信息熵		
	场景1	场景2	场景3
原图	7.4295	6.5879	6.9574
HE	7.8088	7.70713	7.4775
DCP	7.0187	6.6196	6.9077
MSRCR	7.3346	7.70959	6.9775
HF	7.6399	6.4079	6.8533
本文	7.9973	8.0749	7.7942

从表1中可以看出,本文算法的平均梯度最大,而平均梯度越大,说明图像的纹理越清晰;从表2中可以看出,本文算法的信息熵最大,信息熵越大,图像所含内容越丰富。综合客观和主观分析,都可以得到本文算法更具优越性的结论。

## 6 结语

本文提出的基于 Retinex 和同态滤波的多尺度融合水下增强算法,结合 Retinex 算法利用双边滤波估算出反射分量,可以有效地避免图像产生光晕伪影的现象;然后对颜色校正后的图像进行改进的同态滤波增

强,可以改善图像光照不均匀的影响;最后进行拉普拉斯金字塔融合,可以更加丰富图像信息,提高水下图像的清晰度。根据图像定量和定性评价显示,本文算法能够使得图像光照均匀,增强图像的细节部分,从而得到清晰的图像。但是本文同态滤波算法参数需要多次尝试方可求得最优值,下一步将研究如何能快速并且准确地计算出适用于不同彩色图像的参数的算法,进一步使其具有更高的鲁棒性和实用性。

## 参考文献

- [1] 刘卓夫. 基于图像内容的水下目标识别技术研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2003.
- [2] 陈从平,王健,邹雷,等. 一种有效的低对比度水下图像增强算法[J]. 激光与红外,2012,42(5):567-571.
- [3] 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[J]. 光学学报,2018,38(11):86-95.
- [4] JOBSON D J, RAHMAN Z U, WOODDELL G A. Properties and performance of a center/surround Retinex[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1997, 6(3):451-462.
- [5] JI T T, WANG C Y. An approach to underwater image enhancement based on image structural decomposition[J]. Journal of Ocean University of China, 2015, 14(2):255-260.
- [6] 雷飞,朱林,王雪丽. 改进多尺度 Retinex 色彩灰度的水下彩色图像研究[J]. 小型微型计算机系统,2018,39(1):185-188.
- [7] 张业忠. 水下图像复原方法的研究[D]. 郑州:华北水利水电大学,2018.
- [8] 王彬. 基于水下图像增强算法的研究[J]. 科技信息, 2010(29):82.
- [9] 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.
- [10] 王佳慧,武静,张川,等. 用于HVS的拉普拉斯金字塔变换图像融合研究[J]. 电光与控制,2019,26(1):77-80,91.
- [11] HUMMEL R. Image enhancement by histogram transformation [J]. Computer Graphics and Image Processing, 1977, 6(2):184-195.
- [12] GALDRAN A, PARDO D, PICÓN A, et al. Automatic red-channel underwater image restoration[J]. Journal of Visual Communication and Image Representation, 2015, 26(1):132-145.
- [13] 孙杰. 基于MSRCR的水下图像清晰化算法[J]. 无线电工程,2019,49(9):783-787.