

引用格式:蓝善营,陆安山. 基于 NSCT 的水下图像清晰化算法[J]. 微电子学与计算机, 2021, 38(3): 56-60. [LAN S Y, LU A S. Underwater image visibility improving algorithm based on NSCT[J]. Microelectronics & Computer, 2021, 38(3): 56-60.]

基于 NSCT 的水下图像清晰化算法

蓝善营¹, 陆安山²

(1 广西大学 计算机与电子信息学院, 广西 南宁 530004;
2 北部湾大学 电子与信息工程学院, 广西 钦州 535011)

摘 要: 针对水下环境采集到图像质量发生严重退化的问题, 提出了基于非下采样轮廓波变换(Non-subsample Contourlet Transform, NSCT)的水下图像清晰化算法. 先对图像预处理, 补偿红色通道, 再进行白平衡和锐化, 把白平衡图像和锐化图像作为输入, 进行 NSCT 分解. 对于低频分量, 提出了一种区域方差与加权拉普拉斯能量和的融合方法; 采用了改进的引导滤波对高频分量进行处理; 最后进行逆 NSCT 变换和颜色校正, 获得清晰的水下图像. 实验结果表明, 该算法纠正了水下图像色偏, 提升图像对比度, 突出细节信息, 显著提高了水下图像的质量.

关键词: 水下图像; 拉普拉斯能量和; 引导滤波; 非下采样轮廓波变换

中图分类号: TP391.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000—7180(2021)03—0056—05

Underwater image visibility improving algorithm based on NSCT

LAN Shan-ying¹, LU An-shan²

(1 School of Computer Electronics and Information, Guangxi University, Nanning 530004, China;
2 School of Electronics and Information, Beibu Gulf University, Qinzhou 535011, China)

Abstract: A non-subsample Contourlet Transform algorithm for underwater image sharpening was proposed to reduce the degradation of underwater image quality. First, the image is preprocessed, the red channel is compensated, and then the white balance and sharpening are carried out. The white balance and sharpening images are taken as the input for NSCT decomposition. For low frequency components, a fusion method of regional variance and weighted Laplace energy sum is proposed. An improved guided filter is used to process the high frequency components. Finally, inverse NSCT transform and color correction are carried out to obtain clear underwater images. Experimental results show that the algorithm corrects the color distortion, improves the image contrast, highlights the details, and significantly improves the quality of the underwater images.

Key words: underwater images; non-subsampled contourlet transform; sum of laplace energy; guided filter

1 引言

水下图像作为水下信息的重要载体, 受水下复杂环境的影响, 采集到的水下图像质量往往会发生严重退化, 主要表现为色彩失真、细节模糊和低对比度等, 给后续处理研究造成了一定的困扰, 因此, 研究水下图像清晰化方法有助于提高成像质量, 促进

机器视觉技术在海洋领域的应用, 为海洋研究奠定基础, 具有重要的意义. 随着水下成像技术的发展, 水下图像处理算法主要有基于暗通道^[1]、图像融合^[2]及 Retinex 算法^[3]等, 这些算法虽然能在不同程度上改善水下图像质量, 但是图像的色彩、细节和清晰度仍有待进一步提高. 本文结合图像融合思想, 提出了基于 NSCT 的水下图像清晰化方法, 分别提

取白平衡图像和锐化图像的信息进行融合处理,从而达到增强水下图像的效果。

2 水下图像预处理

由于水体的吸收特性使得水下图像红通道的值很小,首先补偿红色通道,Ancuti 等^[4]提出了一种新的补偿方法,本文在此基础上进行改进,充分利用蓝绿通道的信息来补偿红色通道,则改进后的红通道为:

$$I_r(x) = I_r(x) + (\bar{I}_g + \bar{I}_b - \bar{I}_r) * (I_g(x) + I_b(x))(1 - I_r(x)) \quad (1)$$

式中, $I_r(x)$ 、 $I_g(x)$ 、 $I_b(x)$ 为补偿前红、绿和蓝通道的像素值, $\bar{I}_r$ 、 $\bar{I}_g$ 、 $\bar{I}_b$ 红绿蓝三个通道的均值, $I_r(x)$ 为补偿后红通道的像素值。经过补偿后,使用白平衡算法,其颜色效果更加均衡,有效去除了水下图像色

偏。

白平衡虽然纠正了色彩失真,但是忽略了图像细节信息,本文使用 laplcan 算子提取图像高频分量来进行非锐化掩模,laplcan 算子是图像的二阶导数,对图像边缘部分有着很好的响应。将白平衡图像进行锐化,减少由水体的散射作用带来的影响。

3 NSCT 算法

经过预处理得到的图像,包含了水下图像的不同信息,采用 NSCT 分解融合策略,把白平衡图像和锐化图像分解为不同的高低频分量。低频部分代表了水下图像中的背景信息,高频分量代表水下图像中的细节纹理信息,包括边缘和噪声。分别对高低频分量进行融合处理并校正颜色得到清晰化的水下图像。本文算法具体流程如图 1 所示。

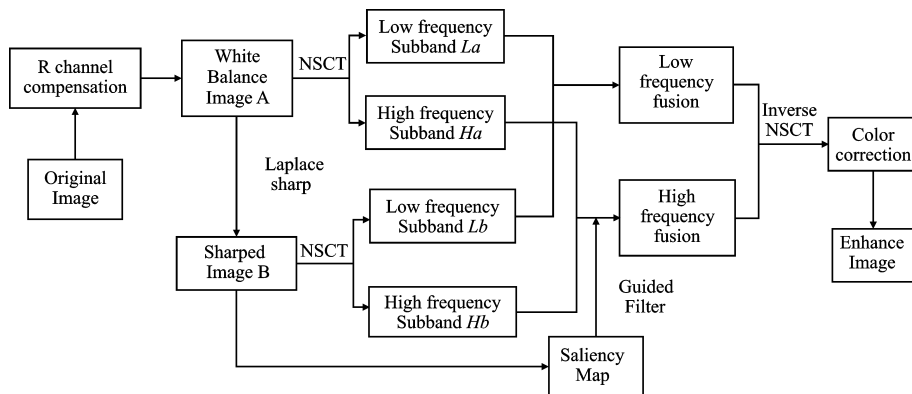


图 1 基于 NSCT 的水下图像清晰化算法流程图

3.1 非下采样轮廓波变换

NSCT 由 Cunha 等^[5]提出,该变换由 contourlet 变换发展而来,继承了 contourlet 变换的良好时频与多尺度等特性,性能表现更佳,并且抑制消除了 Gibbs 效应,因此 NSCT 在图像处理领域中有着广泛的应用。NSCT 由非下采样拉普拉斯塔式滤波器组和非下采样方向滤波器组构成,其原理如图 2 所示。

3.2 低频融合策略

水下图像经过 NSCT 分解后的低频部分,包含了水下图像的变化缓慢的背景信息。对低频子带,提出了一种区域方差与拉普拉斯能量和的融合方法。区域方差定义为:

$$\text{Var}_{J,K}^M(x,y) = \frac{1}{r \times r} \sum_{i=x-1}^{x+1} \sum_{j=y-1}^{y+1} [L_{J,K}^M(i,j) - \mu_{J,K}^M(i,j)]^2 \quad (2)$$

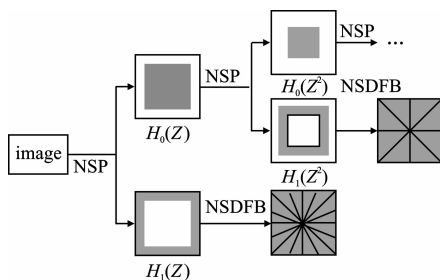


图 2 NSCT 变换原理图

$$\mu_{J,K}^M(x,y) = \frac{1}{r \times r} \sum_{i=x-1}^{x+1} \sum_{j=y-1}^{y+1} L_{J,K}^M(i,j) \quad (3)$$

式中, $L_{J,K}^M$ 表示第 M 幅图像在第 J 尺度分解第 K 方向上的低频子带系数, $M \in (A,B)$, $\text{Var}_{J,K}^M(x,y)$ 和 $\mu_{J,K}^M(x,y)$ 分别为对应的点 (x,y) 在 $r \times r$ 邻域内的方差和均值,本文取 $r = 3$ 。

拉普拉斯能量和能够反映出图像的纹理和方向信息。针对原始算法与周围邻域像素关联性不足,

采用改进的加权拉普拉斯能量和,其定义为:

$$\begin{aligned}
 \text{SML}_{j,k}^M(x,y) &= |2L_{j,k}^M(x,y) - L_{j,k}^M(x - \text{step}, y) - \\
 &L_{j,k}^M(x + \text{step}, y)| + \\
 &|L_{j,k}^M(x, y) - L_{j,k}^M(x, y - \text{step}) - \\
 &L_{j,k}^M(x, y + \text{step})| + \\
 &\frac{\sqrt{2}}{2} |2L_{j,k}^M(x, y) - L_{j,k}^M(x - \text{step}, y - \text{step}) - \\
 &L_{j,k}^M(x + \text{step}, y + \text{step})| + \\
 &\frac{\sqrt{2}}{2} |2L_{j,k}^M(x, y) - L_{j,k}^M(x - \text{step}, y + \text{step}) - \\
 &L_{j,k}^M(x + \text{step}, y - \text{step})| \\
 \text{NSML}_{j,k}^M(x,y) &= \\
 &\sum_{m=-r}^r \sum_{n=-r}^r \mathbf{W} \times \text{SML}_{j,k}^M(x+m, y+n) \quad (4)
 \end{aligned}$$

式中, $\text{SML}_{j,k}^M(x,y)$ 为改进的拉普拉斯能量算子, 考虑了区域中心像素与周围领域像素之间的相关性, step 为可变步长, 本文取值为 1, $\text{NSML}_{j,k}^M(x,y)$ 为改进后的加权拉普拉斯能量和, $\mathbf{W}$ 为加权矩阵, 取值如下:

$$\mathbf{W} = \frac{1}{16} \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 2 & 4 & 2 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

依据方差与改进的 NSML 加权决策, 得到决策图, 其表达式如下:

$$\begin{aligned}
 \text{Lmap}(x,y) &= \\
 &\begin{cases} 1, 0.5 * \text{Var}_{j,k}^A(x,y) + 0.5 * \text{NSML}_{j,k}^A(x,y) \\ \geq 0.5 * \text{Var}_{j,k}^B(x,y) + 0.5 * \text{NSML}_{j,k}^B(x,y) \\ 0, \text{otherwise} \end{cases} \quad (6)
 \end{aligned}$$

则低频系数融合表达式为:

$$L_f = \text{Lmap} * L_A + (1 - \text{Lmap}) * L_B \quad (7)$$

3.3 高频融合策略

经过 NSCT 分解的水下图像, 其高频部分代表图像变化剧烈的边缘和细节信息, 本文采用改进的引导滤波方法对高频信息进行处理。

本文对 Kou 等^[6]的算法进行改进, 引入边缘权重因子 Γ_{LoG} 来实现对平滑参数的自适应控制, 边缘权重因子重新定义为:

$$\Gamma_{LoG}(k) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|LoG(k)| + \gamma_{LoG}}{|LoG(i)| + \gamma_{LoG}} \quad (8)$$

式中, $LoG(k)$ 是任意像素在 3×3 邻域内的高斯拉普拉斯算子, i 表示遍历全部像素, $|\cdot|$ 表示取绝对值, γ_{LoG} 取值为边缘检测结果图像最大值的 0.1 倍, 则改进后代价函数的解为:

$$a_k =$$



(a) 原图像



(b) 低频融合图像

图 3 低频分量融合结果

$$\frac{1}{|\mathcal{W}|} \sum_{i \in \mathcal{W}_k} (q_i p_i - \mu_k p_k) + \frac{\epsilon}{\Gamma_{LoG}(k)} \times \gamma(k) \quad (9)$$

$$\sigma_k^2 + \frac{\epsilon}{\Gamma_{LoG}(k)}$$

$$b_k = p_k - a_k \mu_k \quad (10)$$

LoG 算子是二阶算子, 通过该算子来自适应调整平滑参数 ϵ , 在保证平滑效果的同时突出图像的边缘细节信息。

经过 NSCT 有限尺度的分解, 并不能把全部的高频信息分解完成, 对高频系数进行处理, 首先对其高通滤波, 即:

$$C_{j,k}^M = |H_{j,k}^M - H_{j,k}^M * L_P| \quad (11)$$

式中, L_P 表示大小为 3×3 的拉普拉斯滤波器, 计算公式为:

$$L_P = \frac{1-\alpha}{1+\alpha} * \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & -4 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} + \frac{\alpha}{1+\alpha} * \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 \\ 0 & -4 & 0 \\ 1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

式中, $\alpha \in [0, 1]$, 本文取 $\alpha = 0.5$. $H_{j,k}^M$ 表示第 M 幅图像在尺度 J 上第 K 方向上的高频子带系数, 对其进行平均滤波并取绝对值, 得到显著图 $S_{j,k}^M$, 表达式如下:

$$S_{j,k}^M = |C_{j,k}^M * A_{\text{average}}| \quad (13)$$

式中, A_{average} 为平均滤波器, 利用显著图构造初始显著融合权重, 即:

$$\begin{aligned}
 S_{j,k}^M(n) &= \\
 &\begin{cases} 1, S_{j,k}^M(n) = \max[S_{j,k}^1(n), S_{j,k}^2(n)] \\ 0, \text{otherwise} \end{cases} \quad (14)
 \end{aligned}$$

然后采用改进的引导滤波对初始融合权重图

进行修正. 本文采用 frequency Tuned 算法^[7] 求解锐化图像的显著图, 将其作为引导图像 I_{sharp} , 把 $Sn_{j,K}^M$ 作为待滤波图像, 则经过修正后的融合权重图为:

$$Z_{j,K}^M = G(I_{\text{sharp}}, Sn_{j,K}^M) \tag{15}$$

对获得的融合权重进行归一化处理 $Z_{j,K}^M$, 则高频子带的融合表达式为:

$$H_f = \sum_{e=1}^M \overline{Z_{j,K}^e} * H_{j,K}^e \tag{16}$$

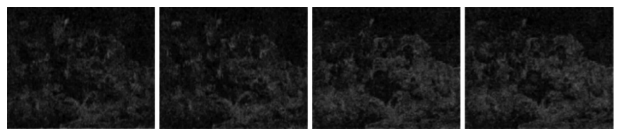


图 4 不同方向的高频分量融合结果

3.4 颜色校正

针对处理后的图像存在对比度低、亮度偏暗等问题, 采用了如下方法进行颜色校正:

$$\begin{aligned} R_{\max} &= R_{\text{mean}} + \mu * R_{\text{var}} \\ R_{\min} &= R_{\text{mean}} - \mu * R_{\text{var}} \end{aligned} \tag{17}$$

$$K_{\sigma}(x,y) = 255 * \frac{R(x,y) - R_{\min}}{R_{\max} - R_{\min}}$$

式中, R_{mean} 和 R_{var} 分别表示图像的均值和方差, R 表示输入的原图像, μ 是控制图像动态范围的参数, K_{σ} 是输出图像, 本文选取 $\mu = 2$ 时能取得更好的视觉效果.

4 实验结果与分析

该章节从主观评价和客观评价两个方面来说明所提算法的有效性. 原图像经过二级 NSCT 分解, 实验结果分别与 Song^[8]、Galdran^[9] 和 Peng^[10] 的算法进行对比, 实验平台为 MATLAB R2016a, Intel i5 处理器 1.8 GHz、内存 4 G、Windows 7 操作系统.

4.1 主观评价

选取不同场景的水下图像, 实验结果与上述算法进行了对比, 结果如图 5 所示.

由试验结果可以看出, 上述算法在水下图像处理中都能起到不同程度的增强作用. 从主观视觉上来说, 本文算法能够有效纠正色偏, 图像色彩效果更为丰富, 细节纹理清晰, 对于 Diver1 中恢复得比较明显, 更加符合人眼视觉特性. 相比于其他算法, 所提算法无论在偏绿或者偏蓝色的水下图像中都能够有效增强图像, 使用范围更加广泛, 图像清晰度较好, 色彩丰富, 在主观视觉增强效果方面具有一定的



(a) Original Images



(b) Song



(c) Galdran



(d) Peng



(e) Ours

图 5 水下图像处理结果对比

优势.

4.2 客观评价

本文采用信息熵(Entropy)、水下图像质量评价指标(UIQM)、水下彩色图像质量评价指标(UCIQE)等三种客观指标进行实验结果对比, 不同算法的评价指标结果如表 1~3 所示.

表 1 coral1 客观评价结果

Coral1	Entropy	UIQM	UCIQE
Song	7.07	2.28	24.69
Galdran	6.86	2.67	29.82
Peng	7.17	3.17	31.68
Ours	7.68	3.77	32.98

表 2 Diver1 客观评价结果

Diver1	Entropy	UIQM	UCIQE
Song	7.54	1.49	26.55
Galdran	7.25	1.82	34.92
Peng	6.63	0.78	25.38
Ours	7.78	2.76	30.47

表 3 Reck 客观评价结果

Reck	Entropy	UIQM	UCIQE
Song	7.35	1.60	25.29
Galdran	7.31	2.38	30.13
Peng	7.37	1.51	26.09
Ours	7.70	3.10	30.81

实验数据表明,所提算法在信息熵方面要优于其他算法,能够有效恢复水下场景的图像,可较好保留图像的信息,色彩更加丰富,Peng 算法对 Diver1 不能有效纠正偏绿色彩,所得到的信息熵均低于其他算法的值.本文算法处理不同图像的 UCIQE 和 UIQM 指标大部分高于其他算法.通过主观和客观评价,说明该算法能够有效纠正水下图像的色偏,视觉效果比上述算法更佳,图像细节更清晰.

5 结束语

为了解决水下图像色偏、视觉模糊和低对比度等问题,提出了基于 NSCT 的水下图像清晰化算法.实验结果表明,相比于其他算法,该算法可应用于大多数场景的水下图像,有效纠正了色偏,保留了更多的细节轮廓信息,增强效果更好.对于低照度及具有人工照明光源的水下图像,提升其处理效果是下一步需要改进的方面.

参考文献:

[1] WU M, LUO K, DANG J J, et al. Underwater image restoration using color correction and non-local prior [C]//OCEANS 2017-Aberdeen. Aberdeen, UK: IEEE, 2017: 1-5. DOI: 10.1109/OCEANSE.2017.8084916.

[2] WANG Y F, DING X Y, WANG R Q, et al. Fusion-based underwater image enhancement by wavelet decomposition[C]//2017 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT). Toronto, ON, Canada: IEEE, 2017: 1013-1018. DOI: 10.1109/ICIT.2017.7915500.

[3] ZHANG S, WANG T, DONG J Y, et al. Underwater image enhancement via extended multi-scale Retinex [J]. Neurocomputing, 2017, 245: 1-9. DOI: 10.1016/j.neucom.2017.03.029.

[4] 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. DOI: 10.1109/TIP.2017.2759252.

[5] DACUNHA A L, ZHOU J, DO M N. The nonsub-sampled contourlet transform: theory, design, and applications[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2006, 15(10): 3089-3101. DOI: 10.1109/TIP.2006.877507.

[6] KOU F, CHEN W H, WEN C Y, et al. Gradient domain guided image filtering[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2015, 24(11): 4528-4539. DOI: 10.1109/TIP.2015.2468183.

[7] ACHANTA R, HEMAMI S, ESTRADA F, et al. Frequency-tuned salient region detection [C]//2009 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Miami, FL, USA: IEEE, 2009: 1597-1604. DOI: 10.1109/CVPR.2009.5206596.

[8] SONG W, WANG Y, HUANG D M, et al. Enhancement of underwater images with statistical model of background light and optimization of transmission map [J]. IEEE Transactions on Broadcasting, 2020, 66(1): 153-169. DOI: 10.1109/TBC.2019.2960942.

[9] 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. DOI: 10.1016/j.jvcir.2014.11.006.

[10] 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. DOI: 10.1109/TIP.2017.2663846.

作者简介:

蓝善营 男,(1994-),硕士研究生.研究方向为水下图像处理.

陆安山(通讯作者) 男,(1970-),教授.研究方向为电子技术应用、非线性电路与系统同步控制研究.

E-mail: 728218533@qq.com.