

基于 Tetrolet 变换的彩色水下图像清晰化算法

沈 瑜, 党建武, 王阳萍, 王博伟

兰州交通大学电子与信息工程学院, 甘肃 兰州 730070

摘要 为了对水下图像传感器获取的彩色图像进行清晰化处理, 提出一种 $la\beta$ 色彩空间的图像清晰化算法。将捕获到的彩色水下图像进行暗原色初步复原后, 映射 RGB 空间至 $la\beta$ 三通道进行清晰化处理。采用 Tetrolet 变换方法处理亮度通道 l , 对包含大部分的轮廓、边缘等线性细节的高频分量采用 Bilateral 滤波器处理, 对包含大部分能量的低频分量进行非局部均匀滤波处理, 然后将处理后的高、低频分量进行反向 Tetrolet 变换得到复原的亮度通道图; 对 α 、 β 通道的色彩偏差进行空间均值颜色校正, 得到复原的 α 、 β 通道图。将处理后的非彩色通道图和彩色通道图反向变换至 RGB 通道, 更新透射率, 得到清晰化的彩色水下图像。实验结果表明, 该算法对彩色水下图像的复原效果较好, 在图像色彩的提升和边缘细节的描述方面效果显著。

关键词 图像处理; 水下图像; Tetrolet 变换; $la\beta$ 色彩空间; 双边滤波器

中图分类号 TP391 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201737.0910002

A Color Underwater Image Clearness Algorithm Based on Tetrolet Transform

Shen Yu, Dang Jianwu, Wang Yangping, Wang Bowei

School of Electronic and Information Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou, Gansu 730070, China

Abstract For the clearness of colored images captured by underwater image sensors, a $la\beta$ color space image clearness algorithm is proposed. On the basis of former dark channel prior algorithm treatment on captured color images, the space mapping is used for further clearness processing, and changing RGB images to $la\beta$ color space images. For the brightness channel l , the Tetrolet transform method is adopted. The bilateral filter is used to filter underwater image noise of high-frequency components, which contains most rough, edges, and other linear details. The nonlocal uniform filter is used to recover the clear low-frequency components, which contains the image's most energy. Processed high-frequency and low-frequency images are inversely converted by Tetrolet transform to get recovered brightness channel image. The spatial mean color correction method is adopted to get recovered α and β channel images, and the processed brightness channel image and color channel images are inversely transformed to RGB space. Updating the transmissivity by input image to get clear color underwater image. Experimental results show that the proposed algorithm works well on underwater image restoration, and it is effective on the image color promotion and edge description.

Key words image processing; underwater image; Tetrolet transform; $la\beta$ color space; bilateral filter

OCIS codes 100.2980; 010.7340; 330.1710

1 引 言

海洋工程应用、海洋能源探测和海洋资源开发等高科技海洋技术已经成为当今世界不遗余力进行的主要研究领域之一, 海洋水下信息探测和作业装备已经成为世界大国重点研究的热点^[1-2]。水下图像是获

收稿日期: 2017-04-05; **收到修改稿日期:** 2017-05-03

基金项目: 国家自然科学基金(61562057, 51541902, 51669010, 61202314, 61663021)、甘肃省自然科学基金(1506RJZA082)、长江学者和创新团队发展计划(IRT_16R36)

作者简介: 沈 瑜(1982—), 女, 博士研究生, 副教授, 主要从事机器视觉和智能信息处理方面的研究。

E-mail: shenyu_sy@163.com

导师简介: 党建武(1963—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事智能信息处理与机器学习方面的研究。

E-mail: 18609311366@163.com(通信联系人)

取水下信息的重要途径。在图像的捕获、存储和传输期间,由于受到复杂水下环境的影响,图像容易出现细节模糊、图像对比度下降以及彩色图像产生很大的色彩偏差、呈现单蓝色雾化等情况。

水下图像严重降质的主要原因有^[3]:1)光在水中的传播复杂,即便非常纯净的水对光也有较强的吸收和衰减作用;2)水体中存在的悬浮颗粒和浮游生物会对光的传播产生较强的散射作用,另外,水体本身的流动等因素会造成图像传感器捕获的图像噪声大,细节信息损失严重;3)外部辅助光源的范围受限,且水波会造成水下光照不均匀,图像传感器捕获的图像会产生光斑等严重噪声。

水下图像的清晰化方法通常分为两类^[4]:图像增强和图像复原。图像增强方法直接从图像像素的角度对图像进行处理,使得图像特征得到一定程度的增强,提高视觉的清晰程度;图像复原方法在分析水下环境的基础上建立水下图像模型,采用不同的手段进行估计参数,以复原水下图像。

当前对水下图像进行清晰化处理的研究较多,例如,Peng等^[4]依据基于图像模糊和光吸收计算的水下环境深度估计方法增强水下图像,效果较好;Borkar等^[5]提出基于单色彩通道的水下图像复原方法,提高了算法效率和图像的对比度;Li等^[6]提出基于最小信息损失原则的水下图像复原算法,得到了较好的实际应用效果;杨爱萍等^[7]基于颜色失真矫正和背景散射提取进行水下图像复原,在颜色的复原和避免光源、噪声等影响方面表现良好;曹美等^[8]结合通道直方图量化的颜色校正和暗原色先验模型进行图像增强,提升了图像的视觉效果;陆慧敏等^[9]利用水下图像退化模型和引导图像滤波器进行颜色校正,克服了光照不均的问题;王马华等^[10]结合偏振成像技术与改进的湍流模型提出水下图像复原算法,在强湍流条件下效果较好;李一兵等^[11]采用 Radon 变换和傅里叶变换方法分别估计模糊的角度和距离,为缺少先验条件的水下图像复原提供依据。上述水下图像复原方法已然取得了一定的进展,但是仍然存在算法复杂或仅针对某一特定应用、普适性差的问题。

本文提出一种基于 Tetrolet 变换的水下彩色图像的清晰化方法。首先,对 RGB 图像进行暗原色先验初步复原;然后,进行 $l\alpha\beta$ 空间映射,并对 $l\alpha\beta$ 三通道进行清晰化处理;最后,将复原后的 $l\alpha\beta$ 三通道图反向映射到 RGB 空间,得到清晰化的水下图像。

2 暗原色先验初步复原

2.1 水下图像退化模型

光从光源发出,在水中传输,到被水下图像传感器捕获,根据整个过程可以建立水下图像退化模型。水下图像退化模型通常由直接光分量、前向散射光和后向散射光三部分构成^[12-13]。

直接光分量指水下物体的反射光传输过程中没有被散射的部分,可表示为

$$D(x) = J(x)t(x), \quad (1)$$

式中 x 为位置, $J(x)$ 为复原后的水下图像(又称场景反射图), $t(x)$ 为透射率(又称介质传输图或传输图),通常随着图像深度值(图像传感器与场景之间的距离)呈指数衰减。所以,又称 $D(x)$ 为直接衰减。

前向散射光是指在传输过程中物体的反射光发生小角度散射的部分,可表示为

$$F(x) = [J(x)t(x)] \cdot g(x), \quad (2)$$

式中 $g(x)$ 为因前向散射而造成的光的扩散作用。

后向散射光是指光线经过水中悬浮颗粒散射后被相机接收的部分,可表示为

$$B = A[1 - t(x)], \quad (3)$$

式中 A 为光源照射强度。

因此,水下图像退化模型可表示为

$$I(x) = D(x) + F(x) + B = J(x)t(x) + [J(x)t(x)] \cdot g(x) + A[1 - t(x)], \quad (4)$$

当场景与相机的距离较小时,可以忽略前向散射带来的图像模糊,于是(4)式可简化为

$$I(x) = J(x)t(x) + A[1 - t(x)]. \quad (5)$$

2.2 暗原色先验估计

在对大量图像进行数据统计的基础上,He等^[14]认为无雾图像非天空部分的局部区域中某些像素点至少有一个颜色通道具有很低的亮度值,甚至趋近于零,即为暗通道,此时有:

$$J_{\text{dark}}(x) = \min_{y \in \Omega(x)} \left[\min_{c \in \{r, g, b\}} J_c(y) \right] \rightarrow 0, \quad (6)$$

式中 $J_c(y)$ 为图像 $J(y)$ 的 R、G、B 三通道中的某一个, $\Omega(x)$ 为以像素点 x 为中心的邻域。

水下图像与雾天图像都会因为介质中的悬浮物导致的光散射产生图像降质, 两者的退化模型在形式上类似。此外, 场景中都会存在物体的阴影、颜色较暗的物体或表面以及色彩鲜艳的物体或表面, 这些景物都满足暗通道先验条件。因此, 可以采用暗原色先验理论去除水下图像的后向散射。此时, 由(5)式可以得到:

$$\min_{y \in \Omega(x)} \left\{ \min_{c \in \{r, g, b\}} \left[\frac{I_c(y)}{A} \right] \right\} = t(x) \min_{y \in \Omega(x)} \left\{ \min_{c \in \{r, g, b\}} \left[\frac{I_c(y)}{A} \right] \right\} + 1 - t(x). \quad (7)$$

由暗原色先验知识可以得到透射率为

$$t(x) = 1 - \min_{y \in \Omega(x)} \left\{ \min_{c \in \{r, g, b\}} \left[\frac{I_c(y)}{A} \right] \right\}, \quad (8)$$

式中光源照射强度取各颜色通道的暗通道中亮度值最大值, 即:

$$A = \max_{x \in I} \{ \min_{c \in \Omega(x)} [I_c(y)] \}, \quad c \in \{r, g, b\}. \quad (9)$$

这样得到的透射率易出现块效应, 需要对透射率进一步细化。He 等^[14]采用软抠图的方法解决该问题。将估计的透射率和背景光代入(5)式, 得到初步复原的水下图像, 可表示为

$$J(x) = \frac{I(x) - A}{t(x)} + A. \quad (10)$$

3 本文算法

初步复原的水下图像由于估计出的透射率不够精确, 会出现块效应。此外, 水下图像在获取过程中容易出现蓝绿色偏, 需要对颜色进行校正才能得到清晰化的水下图像。因此, 将初步复原后的图像映射到 $l\alpha\beta$ 空间, 对非彩色 l 通道进行进一步的滤波处理, 对 α 、 β 色彩空间进行颜色校正。

3.1 算法流程

算法流程如图 1 所示:

1) 将初步复原的彩色水下图像由 RGB 空间映射到 $l\alpha\beta$ 空间, 得到亮度通道图像 F_l 、黄-蓝颜色通道图像 F_α 和红-绿颜色通道图像 F_β ;

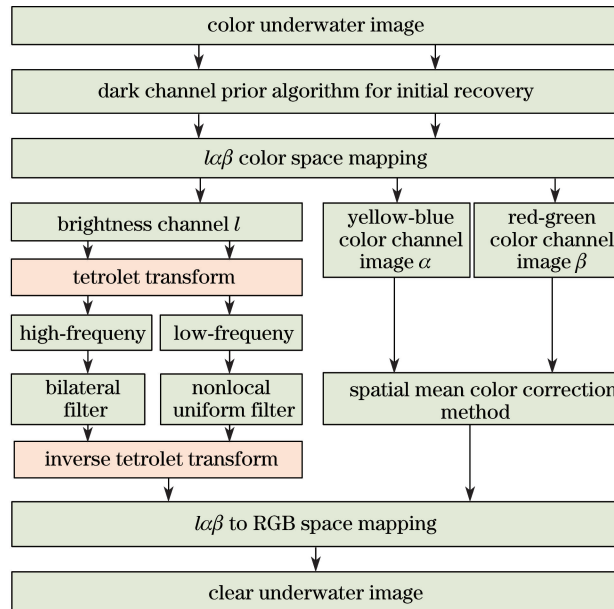


图 1 本文算法流程图

Fig. 1 Flow chart of the proposed algorithm

- 2) 对 F_l 采用 Tetrolet 变换得到高频系数 F_l^H 和低频系数 F_l^L ;
- 3) 对 F_l^H 采用 Bilateral 保边滤波器滤除噪声, 提取出清晰的边缘信息 $F_l^{H,D}$;
- 4) 对 F_l^L 进行非局部均匀滤波, 得到滤波后的低频分量 $F_l^{L,G}$;
- 5) 将处理后的高、低频系数进行反向非下采样轮廓波变换(NSCT)得到复原的亮度通道图 $F_l^{T^e}$;
- 6) 采用空间均值校正方法对 α 、 β 通道进行颜色校正, 得到复原的彩色通道图像 F_α^M 和 F_β^M ;
- 7) 将处理后的 $F_l^{T^e}$ 和 F_α^M 、 F_β^M 反向变换到 RGB 通道, 得到清晰化的彩色水下图像 F^C 。

3.2 空间映射

1998 年提出的 $l\alpha\beta$ 颜色空间理论^[15]建立在人类视觉系统对颜色感知的基础上。该颜色空间对各个通道单独处理, 各通道之间几乎不相关, 因此可以避免彩色交叉畸变。本文算法借助这种不相关性, 对彩色图像进行处理。此外, 映射到 $l\alpha\beta$ 颜色空间的 RGB 图像的色彩空间会变得更加均匀^[16]。将 RGB 图像映射到 $l\alpha\beta$ 颜色空间的具体过程如下。

首先, 将 RGB 颜色空间映射到 LMS 空间, 得到^[17]:

$$\begin{bmatrix} L \\ M \\ S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.3811 & 0.5783 & 0.0402 \\ 0.1967 & 0.7244 & 0.0782 \\ 0.0241 & 0.1288 & 0.844 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} \quad (11)$$

然后, 将 LMS 空间映射到对数空间: $\Gamma = \log L$, $\Omega = \log M$, $\Psi = \log S$ 。为消除通道间的相关性, 使各彩色通道间相互独立, 在对数空间对各彩色通道进行正交变换, 得到:

$$\begin{bmatrix} l \\ \alpha \\ \beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/\sqrt{3} & 0 & 0 \\ 0 & 1/\sqrt{6} & 0 \\ 0 & 0 & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & -2 \\ 1 & -2 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Gamma \\ \Omega \\ \Psi \end{bmatrix} \quad (12)$$

式中 l 表示非彩色通道, 即亮度通道, α 表示色彩通道中的黄-蓝颜色通道, β 表示色彩通道中的红-绿颜色通道。

将彩色水下图像映射到 $l\alpha\beta$ 颜色空间中, 得到亮度通道图像 F_l 、黄-蓝颜色通道图像 F_α 和红-绿颜色通道图像 F_β 。对三个通道的图像分别进行处理, 利用 Tetrolet 域的高、低频分别对 F_l 进行滤波增强处理, 对 F_α 和 F_β 进行色彩校正。彩色水下图像映射到 $l\alpha\beta$ 三通道后的图像如图 2 所示。

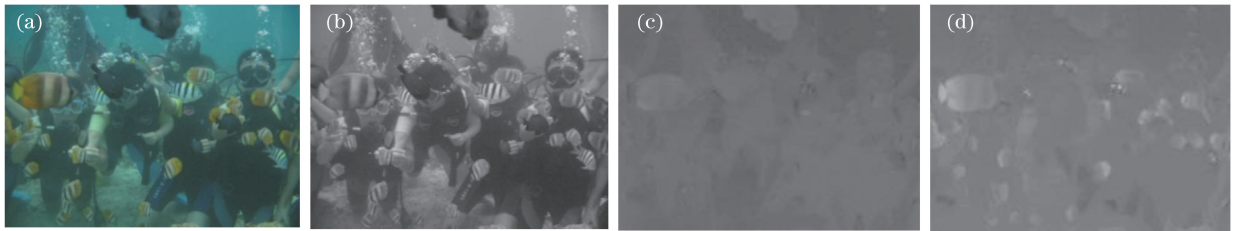


图 2 彩色水下图像映射到 $l\alpha\beta$ 三通道。(a) 原始图像; (b) l 通道; (c) α 通道; (d) β 通道

Fig. 2 Mapping underwater color image to $l\alpha\beta$ three channels. (a) Original image; (b) l channel; (c) α channel; (d) β channel

4 l 亮度通道的清晰化处理

4.1 改进的 Tetrolet 变换

2010 年, Krommweh^[18]基于自适应 Harr 小波提出了图像几何结构表达能力优秀的 Tetrolet 变换方法, 该方法稀疏性强, 具有高能量的变换系数, 是一种简单有效的多尺度几何分析方法。同时, 其支撑域很小, 能够避免吉布斯现象的影响。另外, 理论上 Tetrolet 变换简单, 易处理。在边缘部分采用 Haar 小波函数对图像分解时, 首先将图像分开, 块的大小通常选取 4×4 。在每个图像块中填充与图像几何结构一致的四格拼板, 因此该方法被称为 Tetrolet 变换。单个四格拼板由 4 个正方形拼成, 根据排列组合可以看出, 四格拼板有 5 种基本拼板图案(排除翻转、旋转的情况), 将其视为 Tetrolet 变换的基函数。如图 3 所示。假设有一幅 64×64 的图像, 对该图像进行 Tetrolet 变换的过程如图 4 所示。

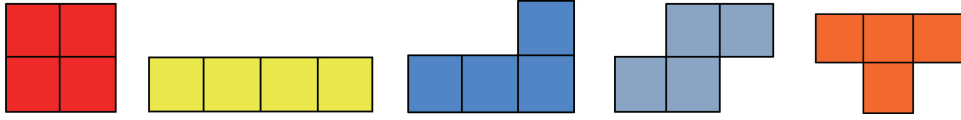


图 3 五种基础四格拼板

Fig. 3 Five basic tetrominoes

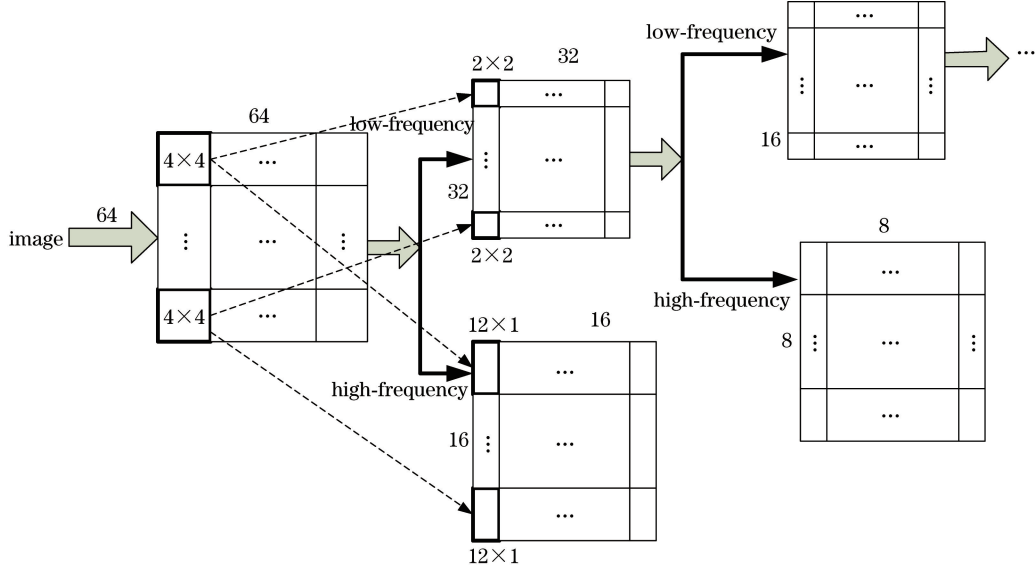


图 4 Tetrolet 变换结构示意图

Fig. 4 Structure diagram of Tetrolet transformation

原始的 Tetrolet 变换在分解后得到的高频能量不集中,范围小,只有少数的轮廓信息。因此将其直接应用于图像融合时,无法提取更多的高频细节,融合图像达不到理想的效果。为了更多地保留高频区域红外图像与可见光图像的边缘、轮廓以及纹理等细节,需要根据图像特征对 Tetrolet 变换进行改进。

假设一幅大小为 $N \times N$ 的原始图像为 $I = [a(i, j)]_{(i,j)=0}^{N-1}$, $N = 2^J$, $J \in \mathbb{N}$, 那么对该图像最多进行 $J - 1$ 层的 Tetrolet 分解。假设对图像进行 d ($d = 1, 2, \dots, J - 1$) 层 Tetrolet 分解,具体步骤如下:

1) 将源图像分割为若干 4×4 的图像块 $B_{i,j}$, $i, j = 0, 1, \dots, N/4^d - 1$;

2) 对图像块 $B_{i,j}$ 分别进行 Tetrolet 分解,假设模板为 $\rho = 1, \dots, 117$, 对每一种可能性进行 Haar 小波变换,分别得到 4 个低频系数 $D^{d,(\rho)}[s]$, $s = 0, 1, 2, 3$ 以及 12 个高频系数 $G^{d,(\rho),z}[s]$, ($z = 1, 2, 3$), $s = 0, 1, 2, 3$ 。 s 表示覆盖 4×4 的块对应的 4 个四格拼板,则有:

$$D^{d,(\rho)}[s] = \sum_{(m,n) \in I_s} \epsilon[0, L(m, n)] D^{d-1}[m, n], \quad (13)$$

$$G^{d,(\rho),z}[s] = \sum_{(m,n) \in I_s} \epsilon[z, L(m, n)] D^{d-1}[m, n], \quad (14)$$

$$\epsilon[z, L(m, n)] = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & -1 & -1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 \\ 1 & -1 & -1 & 1 \end{bmatrix}, \quad (15)$$

式中 L 为 $I_s^{(c)}$ 的 4 个索引 (m, n) 对映射到集合 $\{0, 1, 2, 3\}$ 上的双映射;

3) 选择模板

$$\rho^* = \arg \max_{\rho} \sum_z \|G^{d,(\rho),z}\|_l = \arg \max_{\rho} \sum_{z=1}^3 \sum_{s=0}^3 |G^{d,(\rho),z}[s]|, \quad (16)$$

模板的选择通常采用一阶范数,原始的 Tetrolet 变换选取一阶范数的最小值进行滤波,结果将高频系数缩在很小的取值范围,无法得到足够的边缘和轮廓细节,而改进的 Tetrolet 变换采用一阶范数的最大值进行模板

选择,这样可以尽量保留源图像的高频数据;

4) 采用最优模板 $D^{d,(\rho^*)}[s]$ 将低频系数按照 2×2 形式重新排列;

5) 重复 2)~4) 对图像进行下一层的 Tetrolet 分解,直到变换结束。

采用原始 Tetrolet 算法和改进后的算法分别对图像进行分解,高频细节的对比效果如图 5 所示。改进的 Tetrolet 变换能够很好地保留红外图像和可见光图像的高频边缘、轮廓细节,有利于后续的融合处理。

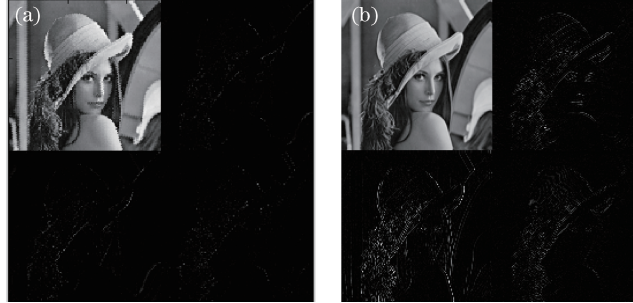


图 5 高频细节对比图。(a) Tetrolet 变换;(b) 改进的 Tetrolet 变换

Fig. 5 Comparison of high-frequency details. (a) Tetrolet transform; (b) improved Tetrolet transform

4.2 高频分量线特征提取

Tetrolet 的多尺度和多方向分解可以得到图像的高频和低频系数。其中,高频系数通常表征图像的边缘、轮廓以及噪声等信息,能够体现图像的细节;低频系数表示图像大部分灰度平滑区域,包含图像的大部分能量,通常代表图像的背景信息。

为了得到清晰的边缘轮廓等线性细节特征,同时滤除噪声,采用非线性的双边滤波器对高频分量进行滤波和线特征提取。双边滤波器综合考虑了像素间的距离因素和像素间的灰度差异,在滤波的同时能够很好地保存边缘轮廓特征。其可定义为

$$H_p = \frac{\sum_{q \in S} G(\|p - q\|, \sigma_s) G(|I_p - I_q|, \sigma_r) I_p}{\sum_{q \in S} G(\|p - q\|, \sigma_s) G(|I_p - I_q|, \sigma_r)}, \quad (17)$$

式中 I_p 为图像 I 在中心像素点 $p(x, y)$ 处的灰度值,经过双边滤波器后,该点的灰度值变为 H_p , I_q 为 $p(x, y)$ 点邻域像素点 $q(x, y)$ 的灰度值,所有的 $q(x, y)$ 构成了邻域像素点集 S 。 G 代表滤波的核函数,采用高斯函数的形式表示为

$$G(x, \sigma) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right), \quad (18)$$

(17) 式中 $G(\|p - q\|, \sigma_s)$ 代表空间接近度因子, $G(|I_p - I_q|, \sigma_r)$ 代表灰度相似度因子, 定义为

$$G(\|p - q\|, \sigma_s) = \exp\{-[(x - u)^2 + (y - u)^2]/2\sigma_s^2\}, \quad (19)$$

$$G(|I_p - I_q|, \sigma_r) = \exp[-(I_p - I_q)^2/2\sigma_r^2], \quad (20)$$

式中 σ_s 和 σ_r 分别为高斯函数中的距离标准差和灰度标准差,两者分别表示图像特征的大小和对比度,对图像的平滑程度起着决定性作用,两种参数也分别代表了滤波宽度。

图 6 描述了双边滤波器在边缘附近的特性,可以看到,在去噪的同时还具有优良的边缘保护能力。

经过 Tetrolet 分解得到的低频分量包含图像的大部分能量和部分噪声。被噪声干扰后,不能单纯通过亮度值的差异准确估计像素之间相似性。为了解决该问题,采用非局部均匀算法,该算法借助整个图像空间像素的亮度值修正当前像素的亮度值,能够去除低频分量的噪声,增强低频分量的视觉效果。

2005 年 Buades 等^[19] 提出了非局部均值去噪算法,其核心思想是充分利用图像中像素周围灰度分布的相似性贡献权值,然后进行滤波。

经过 Tetrolet 分解后得到的低频分量为 $F_l^t = f_l^t(x)$, $x \in I$, 图像中所有像素的加权平均值为

$$N_l^t = \sum_{y \in I} \omega(x, y) f(y), \quad (21)$$

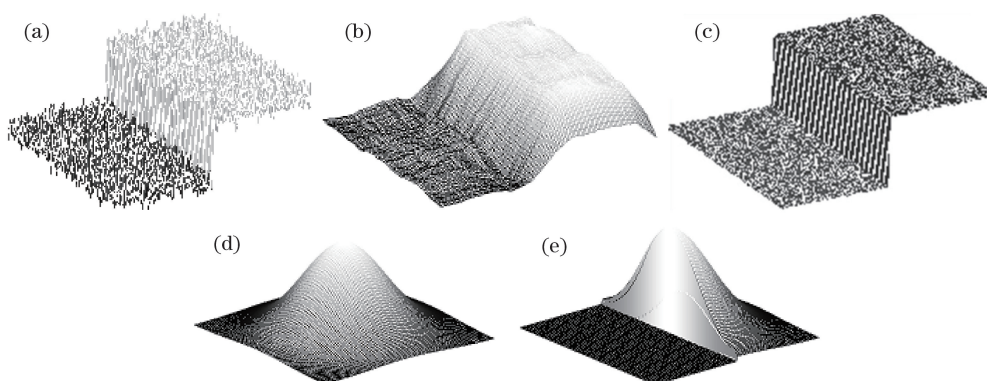


图 6 双边滤波器在图像边缘附近的作用效果。(a)包含噪声的图像区域；(b)值域滤波；(c)双边滤波；
(d)空间域滤波；(e)空间域与值域滤波组合

Fig. 6 Effects on image edge of bilateral filtering. (a) Image region with noises;
(b) value domain filtering; (c) bilateral filtering; (d) spatial domain filtering;
(e) filtering combination of spatial domain and value domain

式中 N_i 代表以像素 i 为中心的四边形邻域, $\omega(x, y)$ 为权值, 其取决于像素点 x 和 y 的相似度, 而像素点 x 和 y 的相似度依赖于其邻域窗口 $v(N_x)$ 和 $v(N_y)$ 的相似度。权值公式为

$$\omega(x, y) = \frac{1}{z(x)} \exp[-\|v(N_x) - v(N_y)\|_{2, \sigma}^2 / h], \quad (22)$$

式中 $0 \leq \omega(x, y) \leq 1$ 且 $\sum_{y \in I} \omega(x, y) = 1$, h 为控制指数函数衰减的滤波参数, $\|\cdot\|_{2, \sigma}$ 代表计算高斯加权的欧氏距离, $z(x)$ 为权值归一化因子。

对于受噪声污染, 分辨率较低的水下图像, 此方法能够充分利用图像的冗余信息进行滤波, 获得更好的去噪效果。

4.3 Tetrolet 逆变换

通过 Tetrolet 逆变换, 将处理后的高频和低频分量进行重构, 得到处理后的亮度通道图像 F_i^{Tc} 。Tetrolet 变换域处理前后的两组亮度通道图像对比如图 7 所示。

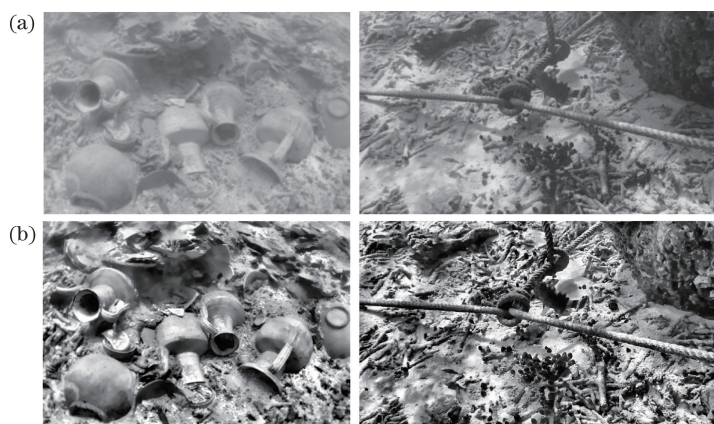


图 7 Tetrolet 处理前后图像。(a) 原始图像；(b) Tetrolet 处理后图像

Fig. 7 Images before and after Tetrolet processing. (a) Original images; (b) after Tetrolet processing

5 $l\alpha\beta$ 颜色通道的色彩校正

光在水下传输时, 由于绿光的波长最短, 所以它在水中传输的距离最长, 导致水下图像多呈绿色或蓝色。为解决色偏问题, 采用空间均值方法对颜色进行校正。

首先, 计算图像 c 通道的均值 S_{mean}^c 和均方误差 S_{var}^c ; 然后, 分别计算每个通道的最大值和最小值:

$$S_{\max}^c = S_{\text{mean}}^c + \mu S_{\text{var}}^c, \quad (23)$$

$$S_{\min}^c = S_{\text{mean}}^c - \mu S_{\text{var}}^c, \quad (24)$$

式中 $c \in \{\alpha, \beta\}$, μ 为调整图像动态范围的参数。

校正后的图像 S_{CR}^c 为

$$S_{\text{CR}}^c = \frac{S^c - S_{\min}^c}{S_{\max}^c - S_{\min}^c} \times 255. \quad (25)$$

6 颜色空间反向映射

将各分量从 $l\alpha\beta$ 颜色空间反向映射到 RGB 颜色空间,具体公式为

$$\begin{bmatrix} \Gamma \\ \Omega \\ \Psi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & -1 \\ 1 & -2 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1/\sqrt{3} & 0 & 0 \\ 0 & 1/\sqrt{6} & 0 \\ 0 & 0 & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} l \\ \alpha \\ \beta \end{bmatrix}, \quad (26)$$

$$\begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 4.4679 & -3.5873 & 0.1193 \\ -1.2186 & 2.3809 & -0.1624 \\ 0.0497 & -0.2439 & 1.2045 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L \\ M \\ S \end{bmatrix}, \quad (27)$$

至此,进行色彩传递处理后可以得到清晰化处理后的图像。

7 实验结果与分析

7.1 主观评价结果分析

为了验证本文方法的有效性,采用 8 组图像进行实验,对比本文算法、文献[20]中的 Retinex 方法和文献[21]中的三通道水下图像清晰化算法的效果。

图 8 给出了 8 组图像经过三种方法处理的结果。图 8(a)所示的源图像呈现场景模糊和蓝绿色偏的现象;图 8(b)为 Retinex 方法的处理结果,处理后的图像较清晰,但是微小边缘细节偏模糊,对远处的场景处理效果较差,同时颜色过校正,呈现偏白色调;图 8(c)为三通道方法的处理结果,处理后的图像对比度较高,微小边缘较清晰,但是仍然存在一定程度的色偏;图 8(d)为本文方法的处理结果,图像的对比度高,边缘清晰,总体颜色饱满鲜艳,对远处的景深场景的处理效果也很好。

7.2 客观评价结果分析

目前,客观评价水下图像的清晰化处理尚无统一的标准。本文从对比度、平均梯度、色偏和峰值信噪比 4 个方面进行比较。

图像的对比度表征图像的细节清晰程度,对比度越大表示图像的细节越清晰,而标准差 S_D 用来衡量图像灰度对比度的强度,即图像灰度在空间分布上的离散程度。通常标准差越大的图像,其灰度对比度越高。标准差的定义为

$$S_D = \sqrt{\frac{1}{M \times N} \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} [I(i, j) - \bar{I}]^2}, \quad (28)$$

式中 M 为图像的宽度, N 为图像的高度, \bar{I} 为均值, $I(i, j)$ 代表图像在像素 (i, j) 处的灰度值。

平均梯度 A_{vg} 是衡量图像清晰度的度量^[22],其表征图像对微小细节反差的表述能力。通常,图像的平均梯度越大,其在某一方向的灰度变化率越大。平均梯度的定义为

$$A_{\text{vg}} = \frac{1}{M \times N} \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} \sqrt{(\Delta I_x^2 + \Delta I_y^2)/2}, \quad (29)$$

式中 M 和 N 分别为图像的宽度和高度, ΔI_x 、 ΔI_y 分别为 x 与 y 方向上的差分。

图像色偏 K 由图像色度的均值和色度的分布特征确定,表征图像颜色偏离正常颜色的程度。色偏越大

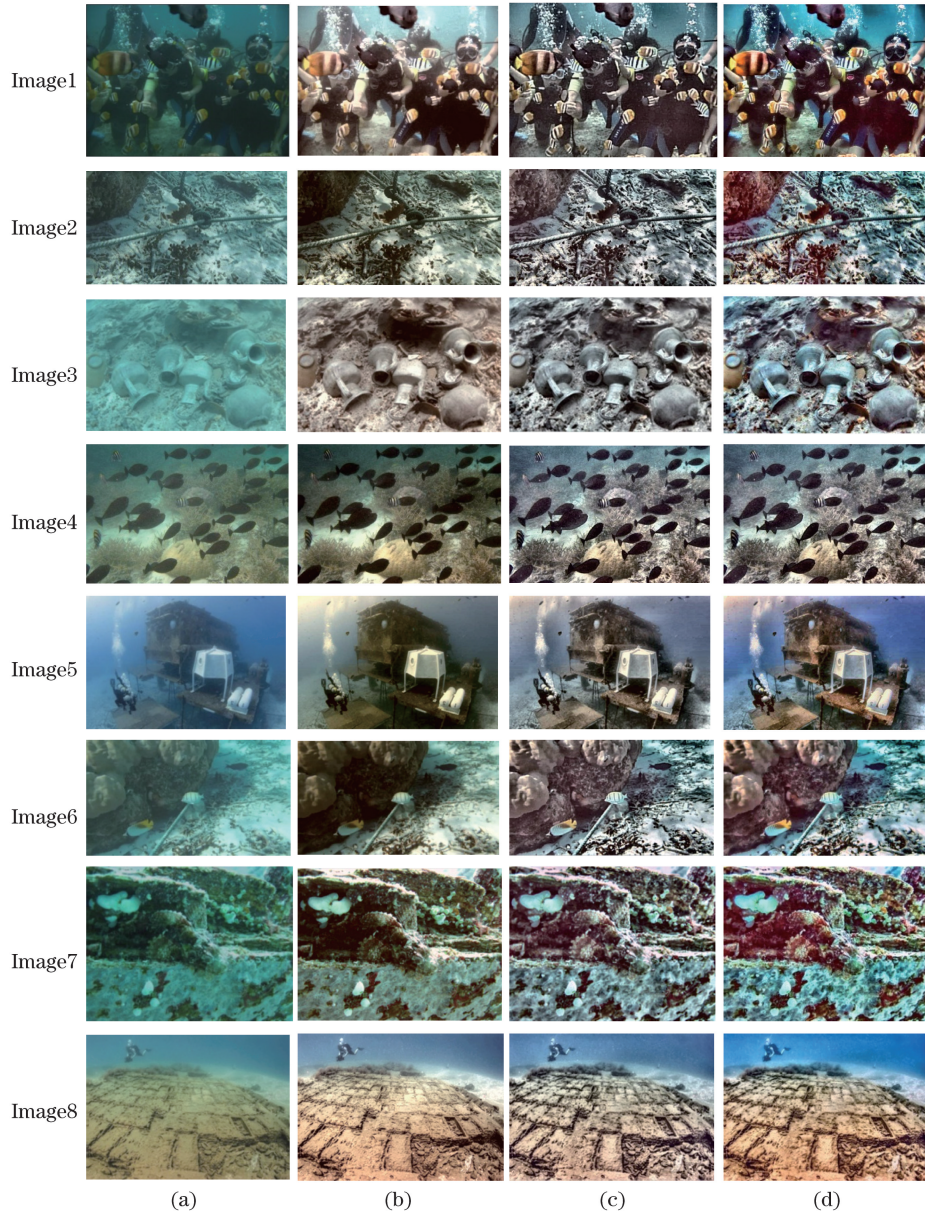


图 8 实验结果对比。(a) 原始图像；(b) Retinex 方法；(c) 三通道方法；(d) 本文方法

Fig. 8 Comparison of experiment results. (a) Original images; (b) Retinex method; (c) three-channel method; (d) proposed method

表示图像越失真。 K 可表示为^[23]

$$K = \frac{100 \sqrt{\mu_{\alpha}^2 + \mu_{\beta}^2}}{\sqrt{\sigma_{\alpha}^2 + \sigma_{\beta}^2} \cdot \max\{|\min[(\sigma_l^2 - t), 1]|, 1\}}, \quad (30)$$

式中 μ_{α} 、 μ_{β} 和 σ_{α} 、 σ_{β} 分别为 α 、 β 通道各自的均值和均方差, t 为阈值, σ_l 为 l 通道的均方差。

原图像 I 与处理后的图像 \bar{I} 之间的均方误差(MSE)定义为

$$M_{SE} = \frac{1}{mn} \sum_{i=0}^{m-1} \sum_{j=0}^{n-1} \|I(i, j) - \bar{I}(i, j)\|^2. \quad (31)$$

峰值信噪比(PSNR)由图像信号峰值与均方误差决定, 表征图像重建质量的好坏。PSNR 定义为

$$P_{SNR} = 10 \cdot \lg \left[\frac{\max(I)^2}{M_{SE}} \right] = 20 \cdot \lg \left[\frac{\max(I)}{\sqrt{M_{SE}}} \right], \quad (32)$$

式中 $\max(I)$ 为图像亮度最大值, 用来替代图像信号强度。

表 1~8 给出了图 8 中 Image1~8 图像分别采用 3 种方法处理的客观评价结果。在 3 种方法中,本文方法的对比度、平均梯度以及峰值信噪比都为最高,表明该方法对于图像细节的处理效果好,图像呈现较高的对比度;图像信息量最丰富;峰值信噪比都在 38 dB~45 dB 范围内,图像质量较好。本文方法的色偏值最小,虽然在个别图像上稍有偏差,但总体效果优于其他两种方法。

表 1 Image1 采用 3 种处理方法的量化比较

Table 1 Quantitative results comparison of three methods in Image1

Image1	S_D	A_{vG}	K	P_{SNR}
Original image	21.9478	3.2446	11.4797	
Retinex method	59.3020	8.7878	11.7245	18.7463
Three-channel method	64.9892	10.5367	11.0100	22.0152
Proposed method	69.1260	14.0523	10.7489	40.9846

表 2 Image2 采用 3 种处理方法的量化比较

Table 2 Quantitative results comparison of three methods in Image2

Image2	S_D	A_{vG}	K	P_{SNR}
Original image	37.4333	3.0789	22.7547	
Retinex method	67.7373	5.6715	23.0091	24.4258
Three-channel method	70.8437	6.3833	20.7889	31.5185
Proposed method	75.8796	16.1642	17.5998	43.8117

表 3 Image3 采用 3 种处理方法的量化比较

Table 3 Quantitative results comparison of three methods in Image3

Image3	S_D	A_{vG}	K	P_{SNR}
Original image	22.1821	4.5231	33.9549	
Retinex method	60.0284	12.1882	33.1598	13.8773
Three-channel method	64.7879	15.7308	32.0912	27.8534
Proposed method	68.6630	15.9291	26.9135	39.2829

表 4 Image4 采用 3 种处理方法的量化比较

Table 4 Quantitative results comparison of three methods in Image4

Image4	S_D	A_{vG}	K	P_{SNR}
Original image	30.3121	3.5554	12.9045	
Retinex method	58.0390	6.8081	13.1663	19.6965
Three-channel method	70.8671	9.2744	13.0921	39.1319
Proposed method	73.3712	16.3484	13.6548	41.8504

表 5 Image5 采用 3 种处理方法的量化比较

Table 5 Quantitative results comparison of three methods in Image5

Image5	S_D	A_{vG}	K	P_{SNR}
Original image	35.2730	1.8218	13.2963	
Retinex method	63.5605	3.4165	13.5406	20.0278
Three-channel method	74.8518	4.4201	12.1948	32.1510
Proposed method	55.7041	15.9609	13.2990	41.4206

表 6 Image6 采用 3 种处理方法的量化比较

Table 6 Quantitative results comparison of three methods in Image6

Image6	S_D	A_{VG}	K	P_{SNR}
Original image	41.3750	5.0257	15.0149	
Retinex method	74.2653	9.0967	14.6459	16.4409
Three-channel method	74.8739	9.5739	13.5683	31.4975
Proposed method	66.9649	20.8972	11.5868	42.6501

表 7 Image7 采用 3 种处理方法的量化比较

Table 7 Quantitative results comparison of three methods in Image7

Image7	S_D	A_{VG}	K	P_{SNR}
Original image	34.2729	4.9122	10.0089	
Retinex method	63.3974	9.2870	10.0493	11.7240
Three-channel method	74.8534	11.1896	9.4062	36.0456
Proposed method	72.8994	18.3051	9.3474	38.6173

表 8 Image8 采用 3 种处理方法的量化比较

Table 8 Quantitative results comparison of three methods in Image8

Image8	S_D	A_{VG}	K	P_{SNR}
Original image	23.2133	4.9122	10.0089	
Retinex method	55.7064	13.2975	9.1934	18.8354
Three-channel method	74.7517	17.6959	6.7261	40.1223
Proposed method	59.8865	15.7695	6.5751	44.0395

分析水下图像清晰化后的图像可知,本文方法在提高图像的对比度,丰富图像边缘方面具有显著的优势,同时对蓝绿色偏的校正也有较好的效果,处理后的图像鲜艳,视觉效果好。

8 结 论

针对彩色水下图像特点,在对水下图像传感器捕获的图像进行初步复原的基础上,对图像进行 $l\alpha\beta$ 空间映射,对每个通道图像的特点进行单独的清晰化处理,即利用 Tetrolet 变换域单独滤波亮度通道,对两个彩色通道进行色彩校正,解决了光散射导致的模糊以及水下图像色偏等问题。实验结果表明,本文方法具有针对性的滤波、增强和颜色校正等处理,能够很好地提高图像的对比度,丰富图像边缘,对于水下色偏的校正具有良好的效果。

参 考 文 献

- [1] 王 孙. 中国深海空间站“十三五”起锚远航[N]. 中国船舶报, 2016-03-16(008).
- [2] Cao Wenzhong. Ministry of industry and information technology of the People's Republic of China: development direction of marine engineering equipment in the next ten years[J]. Port Economy, 2015(12): 15.
曹文忠. 工信部: 未来十年海洋工程装备发展方向敲定[J]. 港口经济, 2015(12): 15.
- [3] Wang Zitao. Underwater dark channel prior method of underwater image enhance[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2014.
王子韬. 基于暗原色方法的水下图像增强[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2014.
- [4] 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.
- [5] Borkar S, Bonde S V. Underwater image restoration using single color channel prior[C]. International Conference on Signal and Information Processing (ICONSIP), 2016: 1-4.

- [6] Li C Y, Guo J C, Cong R M, *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.
- [7] 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.
- [8] Cao Mei, Sheng Huixing, Li Qingwu, *et al.* Underwater color image enhance algorithm based on prior dark-channel model[J]. Chinese Journal of Quantum Electronics, 2016, 33(2): 140-147.
曹美, 盛惠兴, 李庆武, 等. 基于暗原色先验模型的水下彩色图像增强算法[J]. 量子电子学报, 2016, 33(2): 140-147.
- [9] Lu Huimin, Hu Xuelong, Li Yujie, *et al.* Enhancing algorithm based on underwater optical imaging model and guided image filter[J]. Journal of Yangzhou University (Natural Science Edition), 2015, 18(3): 60-63.
陆慧敏, 胡学龙, 李玉洁, 等. 基于引导图像滤波器的水下图像清晰化算法[J]. 扬州大学学报(自然科学版), 2015, 18(3): 60-63.
- [10] Wang Mahua, Zhao Zhengmin, Wang Shihu, *et al.* Restoring method for underwater degraded images based on improved turbulence model and polarization imaging[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(S1): 203-209.
王马华, 赵正敏, 王士湖, 等. 基于改进湍流模型和偏振成像技术的水下退化图像复原方法[J]. 农业工程学报, 2013, 29(S1): 203-209.
- [11] Li Yibing, Fu Qiang, Zhang Jing. Underwater blurred image restoration based on parameter estimation[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2013, 43(4): 1133-1138.
李一兵, 付强, 张静. 水下模糊图像参数估计复原方法[J]. 吉林大学学报(工学版), 2013, 43(4): 1133-1138.
- [12] Jaffe J S. Computer modeling and the design of optimal underwater imaging systems[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 1990, 15(2): 101-111.
- [13] Jaffe J S. Underwater optical imaging: the past, the present, and the prospects[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2014, 40(3): 683-700.
- [14] He K M, Sun J, Tang X O. Single image haze removal using dark channel prior[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2011, 33(12): 2341-2353.
- [15] Reinhard E, Adhikhmin M, Gooch B, *et al.* Color transfer between images[J]. IEEE Computer Graphics and Applications, 2001, 21(5): 34-41.
- [16] Xing Yaqiong, Wang Xiaodan, Liu Jian, *et al.* Fusion technique for multi-focus image based on analysis of grey relation in NSST domain[J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2016, 36(2): 536-544.
邢雅琼, 王晓丹, 刘健, 等. 基于 NSST 域的红外和彩色可见光图像融合[J]. 系统工程理论与实践, 2016, 36(2): 536-544.
- [17] Zhang Ziying, Zhou Mingquan, Shui Wuyang, *et al.* Color transfer based on K-means clustering algorithm and region matching[J]. Journal of System Simulation, 2015, 27(10): 2359-2364.
张子迎, 周明全, 税午阳, 等. 基于 K 均值聚类和区域匹配的颜色迁移技术[J]. 系统仿真学报, 2015, 27(10): 2359-2364.
- [18] Krommweh J. Tetrolet transform: a new adaptive Haar wavelet algorithm for sparse image representation[J]. Journal of Visual Communication and Image Representation, 2010, 21(4): 364-374.
- [19] Buades A, Coll B, Morel J M. A non-local algorithm for image de-noising[C]. Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2005, 2: 60-65.
- [20] Fu X Y, Zhuang P X, Huang Y, *et al.* A retinex-based enhancing approach for single underwater image[C]. IEEE International Conference on Image Processing (ICIP), 2014: 4572-4576.
- [21] Nicholas C B, Anush M, Eustice R M. Initial results in underwater single image dehazing[C]. IEEE Oceanic Engineering Society, 2010: 1-8.
- [22] Wen Haibin, Bi Duyan, Ma Shiping, *et al.* Variational Retinex algorithm for infrared image enhancement with staircase effect suppression and detail enhancement[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(9): 0911005.
温海滨, 毕笃彦, 马时平, 等. 消除阶梯效应与增强细节的变分 Retinex 红外图像增强算法[J]. 光学学报, 2016, 36(9): 0911005.
- [23] Li F, Wu J Y, Wang Y K, *et al.* A color cast detection algorithm of robust performance[C]. IEEE International Conference on Advanced Computational Intelligence (ICACI), 2012: 662-664.