文章编号:1000-1638(2025)03-0243-09 DOI:10.13484/j.nmgdxxbzk.20250303

全通道色彩补偿的SV-TV水下图像增强模型*

杨海波,张福元,金其余
(内蒙古大学数学科学学院,呼和浩特 010021)

摘要:根据水下图像成像特点,结合SV-TV正则化,提出了一种新的水下图像增强模型。该模型采用了基于图像亮度的色彩补偿方法,并针对各个通道进行了调整,有效避免了色彩补偿过度的问题,显著提升了图像对比度,使图像轮廓更加清晰。采用近端交替线性最小化算法(PALM)对模型进行求解,并给出了收敛性分析。实验结果表明,无论是主观评估还是客观评估,所提出的模型性能均优于其他测试方法。

关键词:水下图像增强; 空间正则化; SV-TV正则化; 颜色补偿; 近端交替线性最小化

中图分类号:O224 **文献标志码**:A

高质量的水下图像对于海洋科学研究、海洋工程、水下探测和救援以及非破坏性检测等领域都具有重要的意义,能够为相关任务提供准确的视觉信息和决策依据。然而,受限于水中的光线吸收和散射效应,水下图像往往存在严重的色偏和雾化现象。为了恢复并增强这类退化的水下图像,许多学者提出了针对性的去雾和校正色偏的水下图像增强算法。例如,以Retinex为代表的空间域法[1-2]和以白平衡为代表的色彩校正算法[3-5]。

灰色世界算法(Gray-world)[3]是一种经典的色彩校正算法,该方法假设在一幅具有丰富色彩的图像中,红、绿、蓝(r,g,b)三通道的均值趋于相同的灰度值,通过计算每个通道的增益系数,增强图像的色彩。Ancuti等[4]通过分析水下图像的色彩分布特点,以绿通道为基准补偿红蓝通道的能量,并结合Gray-world提出了一种针对水下图像增强的算法,避免了在曝光区域过度补偿红通道的问题。基于Gray-world的原理,Luo等[5]提出了一种颜色平衡算法,将水下图像各颜色通道的直方图分布值移动到相似的位置,以减轻过度补偿。尽管上述水下图像增强方法取得了较好效果,但由于补偿分量缺乏正则化约束以及对每个像素值的刻板补偿,增强结果仍存在明显色彩失真和过度补偿的问题。

许多著名的正则化方法,如总变分正则化(TV)[6],已被提出用于解决灰度图像恢复的问题。此外,许多基于TV的广义形式也已被提出用于处理不同的图像问题。文献[7]提出了一种特殊的正则化方法用于处理彩色图像的恢复问题,称为SV-TV正则化,该方法基于色度、饱和度和亮度(hsv)的色彩空间,而不是传统的rgb色彩空间,只针对s-分量和v-分量对图像进行平滑处理,可以在减少图像色度变化的同时,去除图像的干扰信息,避免在恢复过程中出现色彩失真和彩色伪影的问题。文献[8]提出了一种基于SV-TV的彩色图像增强模型,借助变分模型将绿通道的信息灵活补偿到红蓝通

* **收稿日期**:2024-04-09; **修回日期**:2024-10-22
基金项目:国家自然科学基金项目(12061052); 内蒙古自治区"高校青年科技英才"项目(NJYT2209)
作者简介:杨海波(1998—),女,内蒙古赤峰人,2021级硕士研究生。E-mail:17648168188@163.com
通信作者:金其余(1980—),男,浙江温州人,教授,博士。研究方向:数学图像处理与大数据分析。E-mail:qyjin2015@aliyun.com

道上,可以有效地恢复潜在图像,这种方法的突出之处在于提高了色彩补偿的灵活性。

目前的水下图像增强算法在颜色补偿上存在对某个通道的颜色补偿过度的问题,导致色彩扭曲,另外对水下图像的去雾化处理也不到位。为此,本文提出了一种基于水下图像成像特点的新型SV-TV水下图像增强模型——FSV-TV 模型。此方法基于图像亮度对各个颜色通道进行灵活补偿,补偿系数的确定依赖于一个空间变化函数,这个函数不仅利用 TV 进行正则化,确保补偿强度在不同区域间的一致性,还通过设置各个颜色通道的补偿比例,有效避免了在曝光区域发生过度补偿的问题。为了进一步提升图像质量,避免失真和彩色伪影的产生,采用 SV-TV 对增强结果进行正则化处理。通过近端交替线性最小化算法(Proximal alternating linearized minimization,PALM)[9]对该模型求解,并给出了所提算法的收敛性分析。实验表明,无论是主观评价还是客观评价,本文提出的模型性能均优于其他先进测试方法。

1 FSV-TV 算法

1.1 模型的建立及求解

本文利用以下符号来构建所提出的水下图像增强模型。h 代表观察到的图像(在[0,1]范围内标准化),u 是目标补偿图像,f 是补偿后的校正图像。Wang 等[8]提出了基于 SV-TV 的彩色图像增强模型,该模型定义为

$$\min_{u,w_{\mathrm{r}},w_{\mathrm{b}},k_1,k_2} E=SV\text{-}TV(u)+\alpha_1\int_\Omega |\nabla w_{\mathrm{r}}|\,\mathrm{d}x\mathrm{d}y+\beta_1\int_\Omega |\nabla w_{\mathrm{b}}|\,\mathrm{d}x\mathrm{d}y+H(u,w_{\mathrm{r}},w_{\mathrm{b}},k_1,k_2) \tag{1}$$

其中 Ω 是具有紧 Lipschitz 边界的 $\mathbf{R}^2$ 的有界连通开子集,

$$H(u,w_{\mathrm{r}},w_{\mathrm{b}},k_1,k_2)=\frac{\mu}{2}\int_\Omega (u-f)^2\mathrm{d}x\mathrm{d}y+\frac{\alpha_2}{2}\int_\Omega (w_{\mathrm{r}}-c_{\mathrm{r}})^2\mathrm{d}x\mathrm{d}y+\frac{\beta_2}{2}\int_\Omega (w_{\mathrm{b}}-c_{\mathrm{b}})^2\mathrm{d}x\mathrm{d}y$$

$$+\frac{\alpha_3}{2}\int_\Omega (w_{\mathrm{r}}-k_1(1-u_{\mathrm{r}}))^2\mathrm{d}x\mathrm{d}y+\frac{\beta_3}{2}\int_\Omega (w_{\mathrm{b}}-k_2(1-u_{\mathrm{b}}))^2\mathrm{d}x\mathrm{d}y,$$

$$f(x,y)=\begin{bmatrix} h_{\mathrm{r}}(x,y)+w_{\mathrm{r}}(x,y)h_{\mathrm{g}}(x,y)\\ h_{\mathrm{g}}(x,y)\\ h_{\mathrm{b}}(x,y)+w_{\mathrm{b}}(x,y)h_{\mathrm{g}}(x,y)\end{bmatrix},u(x,y)=\begin{bmatrix} u_{\mathrm{r}}(x,y)\\ u_{\mathrm{g}}(x,y)\\ u_{\mathrm{b}}(x,y)\end{bmatrix},h(x,y)=\begin{bmatrix} h_{\mathrm{r}}(x,y)\\ h_{\mathrm{g}}(x,y)\\ h_{\mathrm{b}}(x,y)\end{bmatrix},$$

且 $c_{\mathrm{r}}=\dfrac{(\bar{g}-\bar{r})}{\bar{g}}$,$c_{\mathrm{b}}=\dfrac{(\bar{g}-\bar{b})}{\bar{g}}$;$\bar{r},\bar{g},\bar{b}$ 分别是图像 r,g,b 三通道的均值;w_{r} 和 w_{b} 分别是红通道和绿通道的空间变化函数;k_1 和 k_2 是补偿参数。$\mu,\alpha_1,\alpha_2,\alpha_3,\beta_1,\beta_2$ 和 β_3 是用于平衡所提出的能量函数中不同项的参数。公式(1) 中的第一项是关于 u 的 SV-TV 正则项[7],定义为

$$SV\text{-}TV(u)=\int_\Omega \sqrt{|\partial_x u(x,y)|_s^2+|\partial_y u(x,y)|_s^2}\,\mathrm{d}x\mathrm{d}y+$$

$$\alpha\int_\Omega \sqrt{|\partial_x u(x,y)|_v^2+|\partial_y u(x,y)|_v^2}\,\mathrm{d}x\mathrm{d}y,$$

其中 α 为正参数,用于平衡两项的权重。令

$$\partial_x u(x,y)^{\mathrm{T}}=\begin{bmatrix}\partial_x u_{\mathrm{r}}(x,y)\\ \partial_x u_{\mathrm{g}}(x,y)\\ \partial_x u_{\mathrm{b}}(x,y)\end{bmatrix},\partial_y u(x,y)^{\mathrm{T}}=\begin{bmatrix}\partial_y u_{\mathrm{r}}(x,y)\\ \partial_y u_{\mathrm{g}}(x,y)\\ \partial_y u_{\mathrm{b}}(x,y)\end{bmatrix},w=\begin{bmatrix}2&-1&-1\\-1&2&-1\\-1&-1&2\end{bmatrix},$$

则有 $|\partial_x u(x,y)|_s=\dfrac{1}{3}\|w\partial_x u(x,y)^{\mathrm{T}}\|_2$,

$$|\partial_x u(x,y)|_v=\frac{1}{\sqrt{3}}|\partial_x u_{\mathrm{r}}(x,y)+\partial_x u_{\mathrm{g}}(x,y)+\partial_x u_{\mathrm{b}}(x,y)|,|\partial_y u(x,y)|_s=\frac{1}{3}\|w\partial_y u(x,y)^{\mathrm{T}}\|_2,$$

$$|\partial_y u(x,y)|_v=\frac{1}{\sqrt{3}}|\partial_y u_{\mathrm{r}}(x,y)+\partial_y u_{\mathrm{g}}(x,y)+\partial_y u_{\mathrm{b}}(x,y)|。$$

虽然此模型能够较好地增强水下图像的效果，但有时会过度补偿红色或蓝色通道，导致颜色扭曲。本文根据水下图像成像原理，深入分析了该模型，发现模型(1)简单采用 $c_r=\frac{(\bar{g}-\bar{r})}{\bar{g}}$，$c_b=\frac{(\bar{g}-\bar{b})}{\bar{g}}$ 对红色和蓝色通道进行硬性色彩补偿，没有考虑各个像素之间的差异，也没有考虑到绿色图像在水下成像过程中会受到水下散射作用，导致亮度损失，因此产生了红色、蓝色通道色彩补偿过度的问题。为了解决色彩补偿问题，本文提出基于退化图像 h 的图像亮度 m 设置色彩补偿系数 c，使其设置为图像亮度与各个通道均值的差，即 $c=(c_r,c_g,c_b)=(m(x,y)-\bar{r},m(x,y)-\bar{g},m(x,y)-\bar{b})$，其中 $m(x,y)=\frac{1}{3}\sum_{k\in\{r,g,b\}}h_k(x,y)$，$h_k(x,y)$ 表示位于 k 通道的坐标为 (x,y) 的像素值，$\bar{r}$,$\bar{g}$,$\bar{b}$ 分别代表退化图像 r,g,b 三通道的均值。不同于文献[8]，本文对 3 个颜色通道均设置空间变化函数 w 进行补偿，校正图像 $f=h+w$。为了将灰色世界算法引入到模型之中，令 w 与 c 相关，使得校正后的图像各个颜色通道的平均值相等。为了避免在曝光区域出现过度补偿现象，使 w 与 $1-u$ 成比例，同时，对 w 进行 TV 正则化，以保证各区域补偿的一致性。最后为避免补偿过程中出现色彩失真和噪声，使用 SV-TV 对 u 进行约束。基于此，本文提出了一个新的水下图像增强模型，即

$$\min_{u,w,\lambda} SV\text{-}TV(u)+\alpha_1\int_\Omega\|\nabla w(x,y)\|_1\mathrm{d}x\mathrm{d}y+H(u,w,\lambda)\tag{2}$$

其中，Ω 是具有紧 Lipschitz 边界的 $\mathbf{R}^2$ 的连通有界开子集，

$$H(u,w,\lambda)=\frac{\mu}{2}\int_\Omega\|[u-f](x,y)\|_2^2\mathrm{d}x\mathrm{d}y+\frac{\alpha_2}{2}\int_\Omega\|[w-c](x,y)\|_2^2\mathrm{d}x\mathrm{d}y+\frac{\alpha_3}{2}\int_\Omega\|[w-\lambda(1-u)](x,y)\|_2^2\mathrm{d}x\mathrm{d}y,$$

其中，$u,f,w,c\in\mathbf{R}^{m_1\times m_2\times 3}$ 分别为潜在图像、色彩校正后的图像、空间变化函数和色彩补偿系数；m_1，m_2 分别表示矩阵的行数和列数；λ 是补偿参数；μ,α_1,α_2 和 α_3 是平衡所提模型中不同项的参数；范数 $\|\cdot\|_1$ 和 $\|\cdot\|_2$ 分别定义为 $\|u(x,y)\|_1=|u_r(x,y)|+|u_g(x,y)|+|u_b(x,y)|$，$\|u(x,y)\|_2^2=u_r^2(x,y)+u_g^2(x,y)+u_b^2(x,y)$。模型(2)的第三项 $H(u,w,\lambda)$ 包含补偿过程中的数据拟合项，其中第一部分是潜在图像 u 和校正图像 f 的保真项，第二部分是将空间变化函数 w 与色彩补偿系数 c 进行拟合，保证补偿的强度，最后为了避免过度补偿，在第三部分中使 w 与 $1-u$ 成比例。

使用 PALM[9] 方法求解最小化问题(2)，得到下面 3 个子问题：

$$\min_u SV\text{-}TV(u)+\int_\Omega\langle u_k-u_k^n,\nabla_{u_k}H(u^n,w^n,\lambda^n)\rangle\mathrm{d}x\mathrm{d}y+\frac{\sigma_1^n}{2}\int_\Omega\|u_k-u_k^n\|_2^2\mathrm{d}x\mathrm{d}y\tag{3}$$

$$\min_w \alpha_1\int_\Omega\|\nabla w\|_1\mathrm{d}x\mathrm{d}y+\int_\Omega\langle w_k-w_k^n,\nabla_{w_k}H(u^{n+1},w^n,\lambda^n)\rangle\mathrm{d}x\mathrm{d}y+\frac{\sigma_2^n}{2}\int_\Omega\|w_k-w_k^n\|_2^2\mathrm{d}x\mathrm{d}y\tag{4}$$

$$\min_\lambda \langle\lambda-\lambda^n,\nabla_\lambda H(u^{n+1},w^{n+1},\lambda^n)\rangle+\frac{\sigma_3^n}{2}(\lambda-\lambda^n)^2\tag{5}$$

使用 FSV-TV 算法可以求解上述三个子问题，其算法框架如下：

算法　基于 SV-TV 的全通道色彩补偿模型——FSV-TV 算法

初始化　给定初始值 u^0,w^0,λ^0，参数 $\mu,\alpha_1,\alpha_2,\alpha_3$ 和停止准则 ε。

循环　for $n=0$:MaxIter do

　步骤 1　通过交替方向乘子法(ADMM)求解子问题(3)，更新 u^{n+1}；

　步骤 2　使用对偶方法[10]求解子问题(4)，更新 w^{n+1}；

　步骤 3　通过子问题(5)的闭式解可直接迭代更新 λ^{n+1}；

　步骤 4　如果 $\frac{\|u^{n+1}-u^n\|_2^2}{\|u^n\|_2^2}\leqslant\varepsilon$，则停止迭代。

输出　重建图像 u^{n+1}。

1.2　收敛性证明

为了证明FSV-TV算法的收敛性,需要先证明模型(2)为半代数函数且具有Kurdyka-Lojasiewicz(KL)性质。

引理1　模型(2)具有Kurdyka-Lojasiewicz(KL)性质。

证明　由于半代数具有KL性质,因此只需要证明模型(2)是半代数即可。根据文献[9],需证明 $s>0\to s^2$,$s>0\to s^{\frac{1}{2}}$ 是半代数,其图可被重写为

$$\{(s,t)\in\mathbf{R}_+^2:t=s^2\}=\{(s,t)\in\mathbf{R}^2:t-s^2=0\}\cap\mathbf{R}_+^2,$$

$$\{(s,t)\in\mathbf{R}_+^2:t=s^{\frac{1}{2}}\}=\{(s,t)\in\mathbf{R}^2:t^2-s=0\}\cap\mathbf{R}_+^2。$$

这两个集合是 $\mathbf{R}^2$ 和 $\mathbf{R}^3$ 的半代数子集,因此2-范数是半代数,由于 $D_x(u_k)_{ij}$,$D_y(u_k)_{ij}$ 是半代数,则 $\|\cdot\|_s$ 范数,$\|\cdot\|_v$ 范数以及SV-TV范数也是半代数。由于有限个半代数的和依然是半代数,所以模型(2)是半代数,即模型(2)具有KL性质。

为了方便讨论,令 $\Psi(u)=SV\text{-}TV(u)$,$\Phi(w)=\alpha_1\int_\Omega\|\nabla w(x,y)\|_1\mathrm{d}x\mathrm{d}y$,模型(2)被重写为

$$\min_{u,w,\lambda}E=\Psi(u)+\Phi(w)+H(u,w,\lambda)\tag{6}$$

为证明FSV-TV算法的收敛性,需要证明公式(6)满足下面两个条件。

条件1

(Ⅰ) $\Psi:\mathbf{R}^{m_1\times m_2\times 3}\to(-\infty,+\infty)$ 和 $\Phi:\mathbf{R}^{m_1\times m_2\times 3}\to(-\infty,+\infty)$ 是真函数且下半连续;

(Ⅱ) $H:\mathbf{R}^{m_1\times m_2\times 3}\times\mathbf{R}^{m_1\times m_2\times 3}\times\mathbf{R}^{m_1\times m_2\times 3}\to\mathbf{R}$ 是一个 C^1 函数;

(Ⅲ) $\inf_{\mathbf{R}^{m_1\times m_2\times 3}\times\mathbf{R}^{m_1\times m_2\times 3}\times\mathbf{R}^{m_1\times m_2\times 3}}E>-\infty$,$\inf_{\mathbf{R}^{m_1\times m_2\times 3}}\Psi>-\infty$,$\inf_{\mathbf{R}^{m_1\times m_2\times 3}}\Phi>-\infty$。

条件2

(Ⅰ) 对于任意给定的 w,λ,函数 $u\to H(u,w,\lambda)$ 是 $C^{1,1}_{L_1(w,\lambda)}$ 函数,即 $\partial_u H(u,w,\lambda)$ 是关于模 $L_1(w,\lambda)$,$\forall u,u'\in\mathbf{R}^{m_1\times m_2\times 3}$ 的全局Lipschitz连续函数,$\|\partial_u H(u,w,\lambda)-\partial_u H(u',w,\lambda)\|_2\leqslant L_1(w,\lambda)\|u-u'\|_2$。同理,对于任意给定的 u,λ,函数 $w\to H(u,w,\lambda)$ 是 $C^{1,1}_{L_2(u,\lambda)}$ 函数。对于任意给定的 u,w,函数 $\lambda\to H(u,w,\lambda)$ 是 $C^{1,1}_{L_3(u,w)}$ 函数。

(Ⅱ) 存在 $\varphi_q^+,\varphi_q^->0$,$q=1,2,3$ 使得

$$\inf\{L_1(w^p,\lambda^p):p\in\mathbf{N}\}\geqslant\varphi_1^- \text{ 且 } \sup\{L_1(w^p,\lambda^p):p\in\mathbf{N}\}\leqslant\varphi_1^+,$$

$$\inf\{L_2(u^p,\lambda^p):p\in\mathbf{N}\}\geqslant\varphi_2^- \text{ 且 } \sup\{L_2(u^p,\lambda^p):p\in\mathbf{N}\}\leqslant\varphi_2^+,$$

$$\inf\{L_3(u^p,w^p):p\in\mathbf{N}\}\geqslant\varphi_3^- \text{ 且 } \sup\{L_3(u^p,w^p):p\in\mathbf{N}\}\leqslant\varphi_3^+。$$

(Ⅲ) ∇H 在 $\mathbf{R}^{m_1\times m_2\times 3}\times\mathbf{R}^{m_1\times m_2\times 3}\times\mathbf{R}^{m_1\times m_2\times 3}$ 的有界子集上Lipschitz连续,即对于任意有界子集 $B_1,B_2\in\mathbf{R}^{m_1\times m_2\times 3}$,$B_3\in\mathbf{R}^3$,存在常数 $M>0$,使得 $\forall(u,w,\lambda),(u',w',\lambda')\in B_1\times B_2\times B_3$,有 $\|\partial_u H(u,w,\lambda)-\partial_u H(u',w',\lambda'),\partial_w H(u,w,\lambda)-\partial_w H(u',w',\lambda'),\partial_\lambda H(u,w,\lambda)-\partial_\lambda H(u',w',\lambda')\|_2\leqslant M\|(u-u',w-w',\lambda-\lambda')\|_2$。

证明　由SV-TV范数、1-范数、2-范数定义可知,函数 Ψ 和函数 Φ 是有界的下半连续函数,且2-范数在定义域上连续可微且各个一阶偏导均连续,则函数 H 是 C^1 函数。因此,问题(6)满足条件1。

第一步,证明问题(6)满足条件2(Ⅰ)。计算 H 关于 $u_k(x,y)$,$k\in\{\mathrm{r,g,b}\}$ 的偏导数,有

$$\begin{aligned}&\frac{\partial H(u(x,y),w(x,y),\lambda(x,y))}{\partial u_k(x,y)}\\&=\mu(u_k(x,y)-f_k(x,y))+\alpha_3\lambda_k(x,y)(w_k(x,y)-\lambda_k(x,y)+\lambda_k(x,y)u_k(x,y))\\&=(\mu+\alpha_3\lambda_k^2(x,y))u_k(x,y)-\mu f_k(x,y)+\alpha_3\lambda_k(x,y)w_k(x,y)-\alpha_3\lambda_k^2(x,y)。\end{aligned}$$

则对 $\forall u(x,y),u'(x,y)\in\mathbf{R}^{m_1\times m_2\times 3}$ 有

$$\left|\frac{\partial H(u(x,y),w(x,y),\lambda(x,y))}{\partial u_k(x,y)}-\frac{\partial H(u'(x,y),w(x,y),\lambda(x,y))}{\partial u_k(x,y)}\right|$$
$$=(\mu+\alpha_3\lambda_k^2(x,y))\mid u_k(x,y)-u'_k(x,y)\mid,$$

同理，对 $\forall w(x,y),w'(x,y)\in\mathbf{R}^{m_1\times m_2\times 3}$ 和 $\forall\lambda(x,y),\lambda'(x,y)\in\mathbf{R}^{m_1\times m_2\times 3}$，分别有

$$\left|\frac{\partial H(u(x,y),w(x,y),\lambda(x,y))}{\partial w_k(x,y)}-\frac{\partial H(u(x,y),w'(x,y),\lambda(x,y))}{\partial w_k(x,y)}\right|$$
$$=(\alpha_2+\alpha_3)\mid w_k(x,y)-w'_k(x,y)\mid,$$
$$\left|\frac{\partial H(u(x,y),w(x,y),\lambda(x,y))}{\partial\lambda_k(x,y)}-\frac{\partial H(u(x,y),w(x,y),\lambda'(x,y))}{\partial\lambda_k(x,y)}\right|$$
$$\leqslant(m_1+m_2)\alpha_3\mid\lambda_k(x,y)-\lambda'_k(x,y)\mid,$$

令 $L_1(w,\lambda)=\mu+\alpha_3\lambda_k^2(x,y)$，$L_2(u,\lambda)=\alpha_2+\alpha_3$，$L_3(u,w)=(m_1+m_2)\alpha_3$，则问题(6)满足条件 2(Ⅰ)。

第二步，证明问题(6)满足条件 2(Ⅱ)。令 $\varphi_1^+=\varphi_1^-=\mu+\alpha_3\lambda_k^2$，$\varphi_2^+=\varphi_2^-=\alpha_2+\alpha_3$，$\varphi_3^+=\varphi_3^-=(m_1+m_2)\alpha_3$，则问题(6)满足条件 2(Ⅱ)。

第三步，证明问题(6)满足条件 2(Ⅲ)。对 $\forall(u(x,y),w(x,y),\lambda(x,y)),(u'(x,y),w'(x,y),\lambda'(x,y))\in B_1\times B_2\times B_3$，根据条件 2 中(Ⅰ)计算可得

$$\left|\frac{\partial H(u(x,y),w(x,y),\lambda(x,y))}{\partial u_k(x,y)}-\frac{\partial H(u'(x,y),w'(x,y),\lambda'(x,y))}{\partial u_k(x,y)}\right|$$
$$=\mid(\mu+\alpha_3\lambda_k^2(x,y))u_k(x,y)+\alpha_3\lambda_k(x,y)w_k(x,y)-\alpha_3\lambda_k^2(x,y)$$
$$-(\mu+\alpha_3\lambda_k'^2(x,y))u'_k(x,y)-\alpha_3\lambda'_k(x,y)w'_k(x,y)-\alpha_3\lambda_k'^2(x,y)\mid$$
$$=\mid\mu(u_k(x,y)-u'_k(x,y))+\alpha_3\lambda_k^2(x,y)u_k(x,y)-\alpha_3\lambda_k'^2(x,y)u'_k(x,y)$$
$$+\alpha_3\lambda_k(x,y)w_k(x,y)-\alpha_3\lambda'_k(x,y)w_k(x,y)+\alpha_3\lambda'_k(x,y)w_k(x,y)$$
$$-\alpha_3\lambda'_k(x,y)w'_k(x,y)-\alpha_3\lambda_k^2(x,y)+\alpha_3\lambda_k'^2(x,y)\mid$$
$$\leqslant(\mu+\alpha_3)\mid u_k(x,y)-u'_k(x,y)\mid+\alpha_3\mid w_k(x,y)-w'_k(x,y)\mid+\alpha_3\mid\lambda_k(x,y)-\lambda'_k(x,y)\mid。$$

令 $M_1=\max\{\mu+\alpha_3,\alpha_3,\mu\}$，可得

$$\|\partial_u H(u,w,\lambda)-\partial_u H(u',w',\lambda')\|_2\leqslant M_1(\|u-u'\|_2+\|w-w'\|_2+\|\lambda-\lambda'\|_2)。$$

同理可得，存在 M_2、M_3 使得

$$\|\partial_w H(u,w,\lambda)-\partial_w H(u',w',\lambda')\|_2\leqslant M_2(\|u-u'\|_2+\|w-w'\|_2+\|\lambda-\lambda'\|_2),$$
$$\|\partial_\lambda H(u,w,\lambda)-\partial_\lambda H(u',w',\lambda')\|_2\leqslant M_3(\|u-u'\|_2+\|w-w'\|_2+\|\lambda-\lambda'\|_2),$$

令 $M=\max\{M_1,M_2,M_3\}$，则问题(6)满足条件 2(Ⅲ)。

定理 1　设 $\{z^l\}_{l\in\mathbf{N}}=\{(u^l,w^l,\lambda^l)\}_{l\in\mathbf{N}}$ 为 FSV-TV 算法生成序列，假设该序列有界，则下面条件成立。

(Ⅰ) 序列 $\{z^l\}_{l\in\mathbf{N}}$ 长度有限，即 $\sum_{l=1}^{\infty}\|z^{l+1}-z^l\|_2<\infty$；

(Ⅱ) 序列 $\{z^l\}_{l\in\mathbf{N}}$ 收敛于 E 的临界点 $z^*=(u^*,w^*,\lambda^*)$。

证明　因为问题(6)满足假设 1 和假设 2，则由文献[9]中相应讨论可得 FSV-TV 算法是收敛的。

2　实验结果与分析

为验证本文算法的有效性，对 RUSH 数据集[11]中大量具有不同真实水下场景的退化图像进行实验测试，并与灰色世界算法(Gray-world)[3]、颜色平衡算法(CB)[5]、白平衡融合(CBF)[4]、雾线(Haze line)[12]、Two-step[13]和 SVCC[8]算法进行主观(图 1)和客观(表 1—3)比较，其中退化图像为未经任何算法处理的原始图像。所有实验均在Intel(R) Core(TM) i5-1135G7 CPU @ 2.40GHz 的 PC 机上进行，使用 Matlab 2021b 进行实现。

表 1 针对退化图像使用不同算法的恢复结果的 PIQE 值

Table 1 PIQE values of recovery results using different algorithms for degraded images

算法	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)
退化图像	46.652	40.527	26.350	49.436	29.680
Gray-world[3]	28.300	22.233	40.169	44.222	30.792
CB[5]	45.495	36.806	25.228	48.931	24.142
CBF[4]	33.452	**16.095**	53.020	34.223	19.866
Haze line[12]	46.652	40.527	26.350	49.436	29.680
Two-step[13]	37.006	30.760	29.429	52.832	25.317
SVCC[8]	40.314	29.489	31.583	48.111	27.127
ours	**18.398**	18.732	**9.742**	**31.676**	**7.749**

表 2 针对退化图像使用不同算法的恢复结果的 UCIQE 值

Table 2 UCIQE values of recovery results using different algorithms for degraded images

算法	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)
退化图像	0.372	0.376	0.309	0.335	0.310
Gray-world[3]	0.306	0.307	0.311	0.379	0.332
CB[5]	0.368	0.398	0.359	0.360	0.333
CBF[4]	0.419	0.422	0.414	0.426	**0.431**
Haze line[12]	0.372	0.376	0.309	0.335	0.310
Two-step[13]	0.435	0.476	0.422	0.396	0.406
SVCC[8]	0.432	0.434	0.396	0.395	0.382
ours	**0.469**	**0.491**	**0.448**	**0.437**	0.416

表 3 针对退化图像使用不同算法的恢复结果的 UIQM 值

Table 3 UIQM values of recovery results using different algorithms for degraded images

算法	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)
退化图像	2.220	−0.373	2.362	2.474	0.716
Gray-world[3]	3.425	3.572	2.959	3.893	4.027
CB[5]	3.849	3.270	3.495	3.785	3.280
CBF[4]	3.873	4.073	3.009	4.581	**5.215**
Haze line[12]	2.220	−0.373	2.362	2.474	0.716
Two-step[13]	4.439	3.945	3.890	4.218	4.478
SVCC[8]	**4.830**	4.145	4.150	4.289	4.294
ours	4.700	**4.734**	**4.269**	**4.820**	4.864

2.1　主观评价

由于论文篇幅的限制，本文选取其中 5 幅图像的增强对比结果作为示例，如图 1 所示。

图 1　使用不同算法在不同水下环境拍摄的退化图像的恢复结果对比

Fig. 1　Comparison of recovery results of degraded images taken in different underwater environments using different algorithms

不同算法对水下图像有不同程度的增强效果，但也存在一些问题。Gray-world[3] 对红色通道补偿过度，导致恢复的图像严重偏红。CB[5] 虽然注意到了红色通道过度补偿问题，并予以改进，但是并未取得让人满意的效果。CBF[4] 在色彩补偿前补充了红色通道的能量，虽然避免了过度补偿的问题，但使得红色通道能量过强，恢复结果出现黄色的色偏。Haze line[12] 在去雾方面表现良好，恢复出来的图像对比度较高，图像清晰，但处理色偏方面有所不足(见图 1，第 5 行，第 1、2 列)。相比前面的算

法，Two-step 算法[13]处理结果较好，但在处理浓绿色场景拍摄的退化图像时，恢复结果呈现不真实的红色调。SVCC 在处理大部分水下图像时，可以有效平衡水下图像的色彩，只是在处理严重色偏的图像时能力不足(见图 1，第 7 行，第 3、5 列，图像中的白色气泡变成了粉色)，而且会增加图像的噪声(见图 1，第 7 行，第 1 列)。从视觉恢复效果的角度来看，本文提出的算法在校正色偏和去雾方面表现良好，具有一定的优势，有效地纠正了水下图像的色彩偏差，增强了图像的对比度，使图像更加清晰。

2.2 客观评价

本文采用 3 个无参考指标对不同算法的有效性进行客观比较，包括基于感知的图像质量评估器(PIQE)[14]、水下彩色图像质量评价(UCIQE)[15]和水下图像质量测量(UIQM)[16]。其中，PIQE 模拟人类对图像中突出点或空间活跃区域的视觉注意力，利用局部特征的失真情况来解释图像整体的感知质量。一般情况下，PIQE 得分越低，恢复效果越好。而 UCIQE 和 UIQM 则是专门用于定量衡量水下图像恢复效果的无参考指标。UCIQE 是色度、饱和度和对比度的线性组合，UIQM 是色彩度、锐度和对比度的线性组合，这两个指标值越高，说明算法在水下图像恢复时图像中色彩、清晰度和对比度之间的平衡越好。

表 1—3 展示了 5 幅图像采用不同算法恢复结果的指标值，黑体数值表示最好的结果。本文所提方法基本上取得了较低的 PIQE 值，这表示该算法可以较好地恢复图像的边缘细节。对于 UIQM 和 UCIQE 指标，本文提出的算法在退化图像上绝大部分都取得了较好的结果，这说明本文算法在增强水下图像对比度以及色彩恢复方面同样有较好的效果。综合来看，本文提出的算法在大多数情况下的综合表现是最佳的，这意味着该算法在多个方面都能够有效地改善水下图像的质量。

3 结论

本文提出了一种基于亮度的全通道色彩补偿的新型 SV-TV 水下图像增强模型，该模型在校正图像色彩的同时避免了曝光区域的过度补偿问题，从而避免了失真和过多的彩色伪影问题。此外，文中给出了所提算法的收敛性分析，并进行了数值对比实验。实验结果表明，该模型能够有效地增强水下图像效果，校正色偏并去雾，为水下图像处理领域提供了一种有效的解决方案。

参考文献：

[1] FU X Y，ZHUANG P X，HUANG Y，et al. A retinex-based enhancing approach for single underwater image [C]//2014 IEEE International Conference on Image Processing (ICIP). Paris，France：IEEE，2014：4572-4576.

[2] ZHANG S，WANG T，DONG J Y，et al. Underwater image enhancement via extended multi-scale Retinex[J]. Neurocomputing，2017，245：1-9.

[3] BUCHSBAUM G. A spatial processor model for object colour perception[J]. Journal of the Franklin Institute，1980，310(1)：1-26.

[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：A Publication of the IEEE Signal Processing Society，2018，27(1)：379-393.

[5] LUO W L，DUAN S Q，ZHENG J W. Underwater image restoration and enhancement based on a fusion algorithm with color balance，contrast optimization，and histogram stretching[J]. IEEE Access，2021，9：31792-31804.

[6] RUDIN L I，OSHER S，FATEMI E. Nonlinear total variation based noise removal algorithms[J]. Physica D：Nonlinear Phenomena，1992，60(1/4)：259-268.

[7] JIA Z G，NG M K，WANG W. Color image restoration by saturation-value total variation[J]. SIAM Journal on Imaging Sciences，2019，12(2)：972-1000.

[8] WANG W,YANG Y M,NG M K. A spatial color compensation model using saturation-value total variation[J]. SIAM Journal on Imaging Sciences,2022,15(3):1400-1430.
[9] BOLTE J,SABACH S,TEBOULLE M. Proximal alternating linearized minimization for nonconvex and nonsmooth problems[J]. Mathematical Programming,2014,146(1):459-494.
[10] 李建国,蒋萍花.应用对偶方法的 TV 图像去噪[J].电子测量技术,2016,39(12):172-175.
[11] LIU J,LIU R W,SUN J N,et al. Rank-one prior:Real-time scene recovery[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence,2023,45(7):8845-8860.
[12] BERMAN D,LEVY D,AVIDAN S,et al. Underwater single image color restoration using haze-lines and a new quantitative dataset[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence,2021,43(8):2822-2837.
[13] FU X Y,FAN Z W,LING M,et al. Two-step approach for single underwater image enhancement[C]//2017 International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communication Systems (ISPACS). Xiamen, China:IEEE,2017:789-794.
[14] VENKATANATH N,PRANEETH D,MARUTHI CHANDRASEKHAR BH,et al. Blind image quality evaluation using perception based features[C]//2015 Twenty First National Conference on Communications (NCC). Mumbai,India:IEEE,2015:1-6.
[15] YANG M,SOWMYA A. An underwater color image quality evaluation metric[J]. IEEE Transactions on Image Processing:A Publication of the IEEE Signal Processing Society,2015,24(12):6062-6071.
[16] PANETTA K,GAO C,AGAIAN S. Human-visual-system-inspired underwater image quality measures[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering,2016,41(3):541-551.

（责任编委　李　宏）

Full-Channel Color-Compensated SV-TV Underwater Image Enhancement Model

YANG Haibo,ZHANG Fuyuan,JIN Qiyu
(*School of Mathematical Sciences*,*Inner Mongolia University*,*Hohhot* 010021,*China*)

Abstract:According to the imaging characteristics of underwater images,a new underwater image enhancement model was proposed by combining SV-TV regularization. The model adopted a color compensation method based on image brightness and adjusted it for each channel in order to effectively avoid excessive color compensation problems,and significantly improved the image contrast and made the image contours clearer. The proximal alternating linearized minimization algorithm (PALM) was used to solve the model and the convergence analysis was given. The experimental results show that the performance of the proposed model outperforms other tested methods in both subjective and objective evaluations.

Key words:underwater image enhancement; spatial regularization; SV-TV regularization; color compensation; proximal alternating linearized minimization