

# 基于高低频特征增强和透射率修正的复杂图像去雾方法

王士斌, 郭嘉懿

(河南师范大学 计算机与信息工程学院, 河南 新乡 453000)

**摘要:** 针对复杂图像中存在非均匀散射介质(如大气湍流、烟雾、雾霾等), 导致光线在不同区域的传播和散射特性不同, 较难准确恢复图像能见度的问题, 提出一种基于高低频特征增强和透射率修正的复杂图像去雾方法. 首先, 基于奇异值分解和 Gamma 拐点校正, 设计低频特征增强方法; 其次, 基于 Shearlet 变换分解和非线性变换, 得到高频特征增强方法; 再次, 利用软抠图精化所估计的透射率, 构建透射率修正策略; 最后, 融合上述 3 种方法, 根据大气光值和精化透射率, 完成图像去雾, 分别增强高、低频特征后, 将两者叠加, 获得增强的去雾图像. 经去雾图像的视觉感和客观评价指标结果验证表明, 该方法的去雾效果较好, 能有效恢复复杂图像的细节信息, 改善图像的整体视觉质量.

**关键词:** 低频特征增强; 高频特征增强; 透射率估计; 透射率精化; 复杂图像去雾

**中图分类号:** TP391 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5489(2024)05-1138-07

## Defogging Method of Complex Images Based on High and Low Frequency Feature Enhancement and Transmittance Correction

WANG Shibin, GUO Jiayi

(College of Computer and Information Engineering, Henan Normal University, Xinxiang 453000, Henan Province, China)

**Abstract:** Aiming at the problem that there were non-uniform scattering media (such as atmospheric turbulence, smoke, haze, etc.) in complex images, which led to different propagation and scattering characteristics of light in different regions, making it difficult to accurately restore the visibility of the image, we proposed a defogging method of complex image based on high and low frequency feature enhancement and transmittance correction. Firstly, we designed low frequency feature enhancement methods based on singular value decomposition and Gamma inflection point correction. Secondly, based on Shearlet transformation decomposition and nonlinear transformation, we obtained a high frequency feature enhancement method. Thirdly, we used soft cutout to refine the estimated transmittance and constructed a transmittance correction strategy. Finally, by integrating the above three methods, based on atmospheric light values and refined transmittance, image dehazing was completed. After enhancing high and low frequency features respectively, we superimposed the two to obtain an enhanced dehazing image. The visual perception and objective evaluation indicators of dehazing images have been verified that the proposed method has good dehazing effect and can

收稿日期: 2024-01-25.

**第一作者简介:** 王士斌(1981—), 男, 汉族, 博士, 副教授, 从事车辆自组织网络安全、图像处理、图神经网络和多任务遗传算法优化的研究, E-mail: 19838936533@163.com.

**基金项目:** 河南省高等学校重点科研项目(批准号: 24A520018).

effectively restore the detailed information of complex images, improving the overall visual quality of the images.

**Keywords:** low frequency feature enhancement; high frequency feature enhancement; estimation of transmittance; refinement of transmittance; defogging of complex image

复杂图像去雾旨在从受雾或受污染的图像中恢复出清晰的场景信息, 以提高图像质量和可视化效果<sup>[1]</sup>. 但复杂图像中常存在非均匀的散射介质, 如大气湍流、烟雾等, 导致光线的传播和散射特性不同, 使去雾过程更复杂<sup>[2-3]</sup>. 此外, 复杂背景元素的图像纹理和特征受雾气影响, 增加了准确去除雾霾难度. 因此, 解决复杂图像去雾问题对改善图像质量、提升可视化效果及实现计算机视觉的应用具有重要意义.

图像去雾技术目前已得到广泛关注, 并已取得了许多研究成果, 如王可铮等<sup>[4]</sup>将对比感知损失和融合注意力机制融入 Dehaze Former-T 模型, 构建了基于 Transformer 的端到端时序模型, 分别利用  $L_1$  损失函数和对比感知损失函数, 度量重建损失, 提取网络权重, 完成图像去雾, 但该方法基于 Transformer 的模型, 在处理少见或特殊情况的图像时, 无法达到理想的去雾效果, 其泛化能力有限. 吴正平等<sup>[5]</sup>基于轻量级的编码器-解码器架构, 利用并行多尺度卷积网络提取特征, 并在特征注意力机制的作用下, 快速实现雾度分布不均的单幅图像去雾, 该方法采用轻量级的编码器-解码器架构, 对实现快速去雾效果较好, 但由于模型的结构限制, 无法捕捉到图像的复杂特征和细微差异, 导致去雾结果损失细节或产生伪影. Hu 等<sup>[6]</sup>利用亮度分量估计全局大气光以降低发光物体的影响, 推导了基于大气散射模型的场景辐射度饱和度估计模型, 采用拉伸函数快速估计传输速度, 并利用迭代方法解决模型参数, 通过估计每个像素点的不同介质透射率, 实现了更好的去雾效果, 但该方法对数据进行了估计和调整, 存在一定的风险导致图像细节过度处理, 从而产生图像失真或伪影. Sun 等<sup>[7]</sup>提出了基于非局部特征结构张量的三通道 RGB 无人机图像去雾方法, 针对传统暗通道去雾导致的图像边缘光晕现象, 提出了使用非局部结构张量优化图像边缘细节并降噪, 以此实现图像去雾, 但该方法处理的图像较复杂或者存在大面积不均匀分布的雾气时, 会导致过度平滑的问题, 使图像细节丢失较多.

针对上述方法存在的不足, 为解决实际雾天场景的复杂图像去雾问题, 本文结合高频特征增强方法和透射率修正策略, 提出一种复杂图像的两步去雾方法. 先用高低频特征增强方法提升图像的整体亮度和饱和度, 突出图像边缘、细节等信息; 再与透射率修正相结合, 以获取高清晰度、细节丰富的去雾图像.

## 1 图像高低频特征增强方法

图像由像素值变化较大的高频特征和变化缓慢的低频特征组成. 为提高图像的视觉质量, 可分别增强处理两种特征分量, 使两者通过互补增强图像内容的丰富性和细节的可见性. 通过互补的方法, 高频特征增强使图像细节更清晰可见, 低频特征增强使图像光照和颜色恢复更真实自然. 因此, 高低频特征增强方法对图像去雾至关重要, 可提高图像视觉质量, 增强图像内容的丰富性和细节的可见性.

### 1.1 低频特征增强

基于奇异值分解 (singular value decomposition, SVD) 和 Gamma 拐点校正方法, 增强图像中的低频特征分量, 可增强图像的对比度, 修正色彩, 提升图像亮度、饱和度, 改善整体视觉效果<sup>[8]</sup>. 通过增强低频特征, 可使图像的光照分布更均匀, 恢复出真实场景中的自然光照效果. 图像低频特征增强流程如下.

1) 通过奇异值分解将矩阵分解为三部分: 左奇异向量矩阵、奇异值矩阵和右奇异向量矩阵. 在低频特征分量的奇异值分解过程中, 若已知两个正交矩阵  $U_A, V_A$ , 则可利用下列奇异值矩阵完成图像的奇异值分解:

$$A = U_A \Sigma V_A^T, \quad (1)$$

其中  $U, V$  的列分量及  $\Sigma$  中的对角分量分别为矩阵  $A$  的左、右奇异值分量和奇异值.

2) 分解后分量的 Gamma 拐点校正. 假设图像的低频特征分量是  $f_l(x, y)$ , 则利用拐点曲线传递函数, 描述图像的输出  $f'[f_l(x, y)]$  为

$$f'[f_l(x, y)] = \begin{cases} Af_l(x, y), & f_l(x, y) < t, \\ af_l(x, y) + bf_l^2(x, y) + cf_l^3(x, y) + d, & f_l(x, y) \geq t, \end{cases} \quad (2)$$

其中:  $t$  表示同区域内线性与非线性的转换阈值;  $a, b, c, d$  均为项系数.  $a, b, c, d$  分别由下式解得:

$$\begin{cases} a = \frac{t^3 s - t^2 m + t^2 ms + tm - tm^2 - stm^2 - m^3}{(t - m)^3}, \\ b = \frac{t^2 - t^2 s + (t + m)(sm + m)}{(t - m)^3}, \\ c = \frac{ts - t - m - ms}{(t - m)^3}, \\ d = \frac{t^3 - t^3 ms + t^2 m^2 s + t^2 m^2 + t^2 m}{(t - m)^3}, \end{cases} \quad (3)$$

其中  $m, s$  分别为输入的亮度极值及其拐点曲线微分因子.  $s$  通过下式计算得出:

$$s = \frac{k + 1}{k + t}, \quad (4)$$

其中  $k$  为拐点位置的亮度值. 结合式(3)和低频特征分量均值  $M$ , 可推导出  $k$  的计算公式:

$$k = \frac{a(c - dM)}{b}. \quad (5)$$

为提高拐点曲线中间部分的低亮度, 可采用 Gamma 校正改进函数式(2), 以达到低频特征分量增强效果<sup>[9]</sup>. 若阈值的对应亮度是  $\hat{t}$ , 则低频特征增强后的图像为

$$\hat{f}'[\hat{f}_l(x, y)] = \begin{cases} \hat{f}_l(x, y), & \hat{f}_l(x, y) < \hat{t}, \\ a\hat{f}_l(x, y) + b\hat{f}_l^2(x, y) + c\hat{f}_l^3(x, y) + d, & \hat{f}_l(x, y) \geq \hat{t}. \end{cases} \quad (6)$$

3) 分量增强. 对 Gamma 明确的拐点曲线, 利用小波分解增强低频特征分量, 提高对比度和亮度, 获取更高的图像质量<sup>[10]</sup>.

### 1.2 高频特征增强

图像去雾需改善图像在受雾或受污染条件下的能见度, 使场景中的细节更清晰可见. 低频分量增强了图像中的全局信息, 而高频特征主要包含图像的纹理和边缘等细节信息, 通过增强高频特征, 可提高图像的纹理细节和边缘的锐利度, 使被雾霾遮挡的细节更清晰可见. 高频特征增强方法利用 Shearlet 变换分解和非线性变换, 提升图像细节和边缘信息的清晰度.

利用非采样金字塔逐层多尺度分解图像, 每分解一次即得一个高频特征分量<sup>[11]</sup>. 经改进剪切波、逆 Fourier 变换和二维卷积的处理, 逐层细分高频特征分量方向, 实现方向分解. 基于 Shearlet 变换的高频特征分量分解流程如图 1 所示.

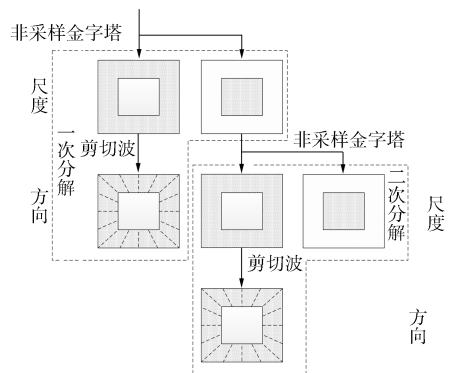


图 1 高频特征分量分解示意图

Fig. 1 Schematic diagram of high frequency characteristic component decomposition

假设非线性变换增益的范围调节系数和强度控制系数分别是  $e_1$  和  $e_2$ , 则非线性变换分解后的高频特征分量  $f_h(x, y)$  为

$$f_h(x, y) = \frac{e_1(\hat{f}'[\hat{f}_l(x, y)] - e_2) + e_1 e_2 + e_2 \hat{f}'[\hat{f}_l(x, y)]}{e_2 + e_1 e_2 + e_1 \hat{f}'[\hat{f}_l(x, y)] + e_2 \hat{f}'[\hat{f}_l(x, y)]}. \quad (7)$$

## 2 透射率修正

当入射光在折射作用下穿过透明介质时会导致出射, 穿过后的光通量与入射光通量的比值即为透射率, 是导致有雾图像模糊、对比度低的主要因素. 只有准确估计、调整透射率, 才能获取高清晰度、细节丰富的去雾图像. 在图像去雾过程中, 透射率是一个关键参数, 它决定了光线通过大气层时的散射程度. 准确估计和调整透射率可获得高清晰度和细节丰富的去雾图像. 高频特征增强可帮助提升图像的细节和边缘信息的清晰度, 而透射率的估计和修正则能更准确地恢复图像中的透射光分量.

透射率与大气光值存在密切关系. 大气光是指自由空间中的天空亮度, 它反映了光线在摄影场景中遇到的环境散射和反射. 在有雾场景中, 雾滴会散射和吸收光线, 导致入射光线中的一部分被散射成为背景中的大气光. 因此, 透射率与大气光值之间存在反相关关系. 当透射率较低时, 雾滴对光线的吸收和散射作用较强, 入射光线中的大气光成分也较高; 当透射率较高时, 雾滴对光线的影晌较小, 背景中的大气光成分较低. 设透射率为  $\lambda(x, y)$ , 红、绿、蓝中任意色彩通道的物体原有信息、初始有雾图像和大气光值分别为  $\varphi_{R,G,B}(x, y), f_{R,G,B}(x, y), E_{R,G,B}$ , 则 4 个参数的关系为

$$\frac{f_{R,G,B}(x, y)}{E_{R,G,B}} = \frac{\varphi_{R,G,B}(x, y) \times \lambda(x, y) \times f'_h(x, y)}{E_{R,G,B}} - \lambda(x, y). \quad (8)$$

已知以像素点  $(x, y)$  为中心的区域  $\theta(x, y)$  内, 设透射率为  $\bar{\lambda}(x, y)$ , 则最小色彩通道中的大气光值由下式解得:

$$\min_{R,G,B} \frac{f_{R,G,B}(\hat{x}, \hat{y})}{E_{R,G,B}} = \bar{\lambda}(x, y) \left( \min_{R,G,B} \frac{\varphi_{R,G,B}(\hat{x}, \hat{y})}{E_{R,G,B}} - 1 \right), \quad (9)$$

其中  $(\hat{x}, \hat{y})$  为区域  $\theta(x, y)$  内不同于  $(x, y)$  的另一像素点. 取方程最小值, 得

$$\min_{(\hat{x}, \hat{y}) \in \theta(x, y)} \left( \min_{R,G,B} \frac{f_{R,G,B}(\hat{x}, \hat{y})}{E_{R,G,B}} \right) = -\bar{\lambda}(x, y) + \bar{\lambda}(x, y) \times \min_{R,G,B} \frac{\varphi_{R,G,B}(\hat{x}, \hat{y})}{E_{R,G,B}}. \quad (10)$$

根据暗通道先验原理<sup>[12]</sup>, 合并式(9)和式(10), 可利用下式估计透射率:

$$\bar{\lambda}(x, y) = 1 - \min_{(\hat{x}, \hat{y}) \in \theta(x, y)} \left( \min_{R,G,B} \frac{f_{R,G,B}(\hat{x}, \hat{y})}{E_{R,G,B}} \right). \quad (11)$$

因为估计所得的透射率为定值, 所以图中存在明显的斑块效应, 且边界处连贯度欠佳. 故利用软抠图, 精化透射率, 可提高图像去雾效果. 已知与抠图 Laplace 矩阵  $L$  同尺寸的单位矩阵  $U$  和权重  $K$ , 则透射率精化值  $\hat{\lambda}(x, y)$  为

$$K\bar{\lambda}(x, y) = \frac{\hat{\lambda}(x, y)(L + KU)}{L}. \quad (12)$$

## 3 复杂图像去雾方法

本文结合高低频特征分量增强和透射率修正, 提出一种用于复杂图像的去雾方法, 以有效恢复图像的细节信息, 优化图像视觉观感. 复杂图像的去雾方法流程如图 2 所示.

复杂图像去雾方法实现步骤如下:

1) 大气光值估计. 输入有雾图像  $f(x, y)$ , 利用下式获取暗通道图像:

$$f_{\text{dark}}(x, y) = \min_{(\hat{x}, \hat{y}) \in \theta(x, y)} \left( \min_{R,G,B} f_{R,G,B}(\hat{x}, \hat{y}) \right), \quad (13)$$

根据图  $f_{\text{dark}}(x, y)$  内的高亮度像素, 取图像  $f(x, y)$  中的高强度像素值作为大气光值  $E$ .

2) 透射率估计与精化. 利用式(8)~(12)估计并精化透射率, 得到平滑的透射率图.

3) 图像去雾. 将大气光值与精化透射率代入下列大气散射模型中, 完成图像去雾:

$$f_{\text{after}}(x, y) = \frac{f(x, y) - E + E\hat{\lambda}(x, y)}{\alpha\hat{\lambda}(x, y)}, \quad (14)$$

其中  $\alpha$  为透射率调控因子, 避免去雾后图像整体偏白.

4) 高低频特征分解. 将去雾后图像的 RGB 颜色模型转换至 YUV 颜色模型, 非下采样轮廓波变换 Y 分量, 取得低频特征<sup>[13]</sup>. 利用下式对全部像素与低频特征做差, 取得高频特征:

$$\begin{cases} f_h(x,y) = f(x,y) - f_l(x,y), & f(x,y) > f_l(x,y), \\ f_h(x,y) = f_l(x,y) - f(x,y), & f(x,y) \leq f_l(x,y). \end{cases} \quad (15)$$

- 5) 高低频特征增强. 利用 1.1 节和 1.2 节方法, 分别增强高低频特征分量.  
6) 增强特征叠加. 将高低频特征分量增强后的两幅图像求和, 得到最终的去雾图像.

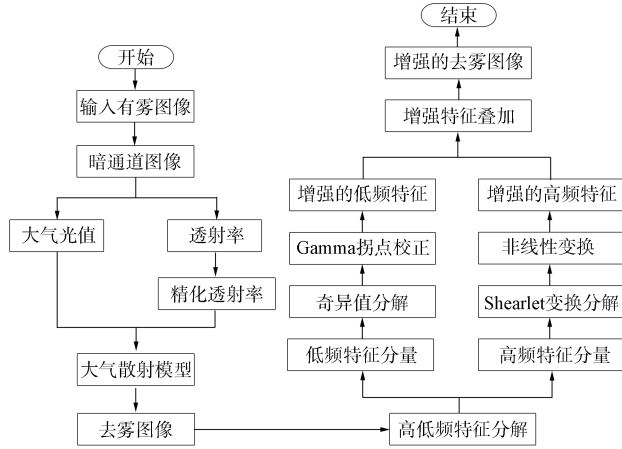


图 2 复杂图像去雾方法流程

Fig. 2 Flow chart of defogging method of complex image

## 4 复杂图像去雾实验分析

为验证高低频特征增强和透射率修正下复杂图像去雾方法的应用性能, 采用基于 Internet protocol 的网络摄像机拍摄浓雾环境中的城市居住区, 得到  $640 \times 480$  尺寸图像. 采集到的原始有雾图像如图 3 所示.

实验中, 将奇异值阈值设为 0.2, Shearlet 变换参数设为 5 个尺度和 16 个方向, 采用  $20 \times 20$  大小的滑动窗口进行透射率估计. 通过上述参数设置, 在复杂的雾霾环境中测试本文方法的性能, 以验证其对复杂图像去雾的应用效果. 分别采用文献[4]方法、文献[5]方法、文献[6]方法和本文方法进行图像去雾, 对比不同方法去雾后图像的视觉观感和客观评价指标, 并利用仿真软件 MATLAB 输出实验结果.

### 4.1 视觉观感

分别利用文献[4]方法、文献[5]方法、文献[6]方法和本文方法进行图像去雾, 复杂图像去雾后的视觉观感对比结果如图 4 所示. 由图 4 可见: 尽管各方法均不同程度地去除了图像中的雾气, 但 3 种对比方法留存的雾气均明显更多, 几乎遮盖了雾中的所有景物, 且整体偏暗, 过度曝光, 进而导致颜色失真, 浓雾边缘也因分布不均及结构过于丰富的问题而出现了斑块现象, 且随着去雾程度的增加而越显著; 而本文方法通过增强高低频特征分量, 修正透射率, 不仅成功去除了图像中的大部分雾气, 几乎展现了景物的所有信息, 而且有效恢复了复杂图像的细节信息, 边缘过渡较好, 亮度适中, 景物颜色更接近实际场景, 无明显斑块、光晕现象, 改善了图像的整体视觉质量. 这是因为本文方法通过增强高低频特征分量和修正透射率, 在去除雾气的同时有效恢复了复杂图像的细节信息, 改善了图像的整体视觉质量.

### 4.2 客观评价指标

在视觉观感上, 本文方法在处理复杂图像时有一定优势. 为避免主观臆断去雾效果, 下面选取 3 个指标自然图像质量(负向性)、结构相似性(正向性)、峰值信噪比(正向性)客观、综合地评估不同



图 3 原始有雾图像

Fig. 3 Original foggy image

方法对复杂图像的去雾质量. 采集 10 幅不同程度雾气浓度的居住区图像, 降序排列各图像, 不同方法对复杂图像的去雾效果评价指标结果如图 5 所示.



图 4 不同方法对复杂图像去雾后的视觉观感对比

Fig. 4 Comparison of visual perception after fog removal of complex images by different methods

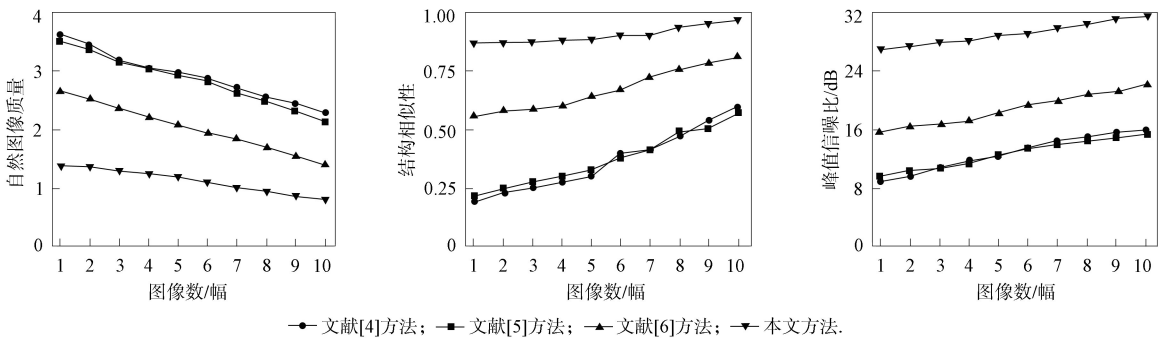


图 5 不同方法对复杂图像去雾效果评价指标对比结果

Fig. 5 Comparison results of evaluation indicators for defogging effect of complex images by different methods

由图 5 可见, 本文方法的自然图像质量、结构相似性和峰值信噪比数值均比对比方法更优, 且与雾气浓度的关联度相对较弱, 各目标图像的指标均值分别为 1.11, 0.9, 29.2 dB. 这是因为本文方法基于高低频特征增强策略中奇异值分解、Gamma 拐点校正和 Shearlet 变换、非线性变换的优势, 在复杂图像去雾方面表现了较强的结构、细节保留能力和亮度、对比度调节能力, 通过高清晰度、高色彩还原度、低噪声等优势, 充分展现了图像内容的表现力. 并在透射率修正方法和透射率调控因子的共同作用下, 不但取得了高质量的去雾图像, 而且大幅度降低了雾气浓度对去雾效果的干扰, 达到了复杂图像去雾的预期效果.

综上所述, 针对复杂图像因结构丰富、雾气分布不均等, 极易在去雾过程中出现颜色失真、细节丢失甚至无法真正实现去雾等问题, 本文提出了一种基于高低频特征增强和透射率修正的构建复杂图像去雾方法. 实验结果表明, 本文方法通过增强高低频特征分量、修正透射率, 在去除雾气的同时成功恢复了图像的细节信息和边缘过渡, 显著改善了图像整体视觉质量. 同时, 在透射率修正和调控因子的共同作用下, 该方法能显著降低雾气浓度对去雾效果的干扰.

## 参 考 文 献

- [1] 孟红记, 刘沛谚, 胡振伟. 基于注意力特征融合稠密网络的图像去雾算法 [J]. 东北大学学报(自然科学版), 2022, 43(12): 1717-1723. (MENG H J, LIU P Y, HU Z W. Image Dehazing Algorithm Based on Attentional Feature Fusion and Dense Network [J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2022, 43(12): 1717-1723.)
- [2] 陈凌波, 朱树先, 祝勇俊, 等. 基于 5G 通信和图像增强算法的交通监控系统设计 [J]. 科学技术与工程, 2022, 22(4): 1510-1516. (CHEN L B, ZHU S X, ZHU Y J, et al. Design of Traffic Monitoring System Based on 5G Communication and Image Enhancement Algorithm [J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(4): 1510-1516.)
- [3] 邬开俊, 丁元. 宽型自注意力融合密集型残差网络的图像去雾 [J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2023, 50(8): 13-22. (WU K J, DING Y. Wide Self-attention Mechanism Fusion Dense Residual Network Image Dehazing [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2023, 50(8): 13-22.)
- [4] 王可铮, 徐玉芬, 周尚波. 结合对比感知损失和融合注意力的图像去雾模型 [J]. 计算机工程, 2023, 49(8): 207-214. (WANG K Z, XU Y F, ZHOU S B. Image Dehazing Model Combined with Contrastive Perceptual Loss and Fusion Attention [J]. Computer Engineering, 2023, 49(8): 207-214.)
- [5] 吴正平, 程洁莹, 雷帮军, 等. 基于特征注意力的快速非均匀雾图像去雾算法 [J]. 国外电子测量技术, 2023, 42(9): 9-18. (WU Z P, CHENG J Y, LEI B J, et al. Fast Nonhomogeneous Image Dehazing Algorithm Based on Feature Attention [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2023, 42(9): 9-18.)
- [6] HU D S, YANG Y, LI B, et al. Fast Outdoor Hazy Image Dehazing Based on Saturation and Brightness [J]. IET Image Processing, 2022, 16(3): 900-912.
- [7] SUN X M, HAN Y, CHEN Y, et al. Aerial Image Defogging Method Based on Nonlocal Feature Structure Tensor by UAV Cameras with Three-Channel RGB Cameras [J]. Journal of Applied Remote Sensing, 2022, 16(4): 046515-1-046515-17.
- [8] 谭晓东, 赵奇, 文明珠, 等. 基于 BEMD、DCT 和 SVD 的混合图像水印算法 [J]. 浙江大学学报(理学版), 2023, 50(4): 442-454. (TAN X D, ZHAO Q, WEN M Z, et al. A Hybrid Image Watermarking Algorithm Based on BEMD, DCT and SVD [J]. Journal of Zhejiang University (Science Edition), 2023, 50(4): 442-454.)
- [9] 李灿林, 朱金娟, 刘金华, 等. 一种自适应 SSR 的雾天低照度图像增强方法 [J]. 计算机应用与软件, 2022, 39(9): 233-239. (LI C L, ZHU J J, LIU J H, et al. An Adaptive SSR Method for Foggy Low Illumination Image Enhancement [J]. Computer Applications and Software, 2022, 39(9): 233-239.)
- [10] 阿卜杜如苏力·奥斯曼, 艾力米努·阿布力江, 祖丽哈也提·艾合买提. 小波域内循环平移操作的图像高分辨率重建算法 [J]. 应用科学学报, 2022, 40(2): 279-287. (AOSMAN A, ABULIJIANG A, AIHEMAITI Z. Image High Resolution Reconstruction Algorithm Using Directional Cycle Spinning Operations in Wavelet Domain [J]. Journal of Applied Sciences, 2022, 40(2): 279-287.)
- [11] 李云红, 李嘉鹏, 苏雪平, 等. 基于 LatLRR 与 NSP 分解的红外与可见光图像融合 [J]. 激光与红外, 2023, 53(9): 1441-1448. (LI Y H, LI J P, SU X P, et al. Infrared and Visible Image Fusion Based on LatLRR and NSP Decomposition [J]. Laser & Infrared, 2023, 53(9): 1441-1448.)
- [12] 马悦, 金正猛, 冯灿. 基于边缘检测暗通道先验的全变差图像去雾算法 [J]. 南京邮电大学学报(自然科学版), 2023, 43(4): 47-57. (MA Y, JIN Z M, FENG C. A Total Variation Image Dehazing Algorithm Based on Dark Channel Prior with Edge Indicator [J]. Journal of Nanjing University of Posts and Telecommunications (Natural Science), 2023, 43(4): 47-57.)
- [13] 宋野. 数字图像低频成分轮廓丢失边缘保留仿真 [J]. 计算机仿真, 2021, 38(5): 384-387. (SONG Y. Simulation of Lost Edge Preservation of Low Frequency Component Contour in Digital Image [J]. Computer Simulation, 2021, 38(5): 384-387.)