

•信息工程•

DOI:10.15961/j.jsuese.201901229



本刊网刊

## 基于线性变换的自适应透射率去雾算法

杨 燕, 姜沛沛, 岳 辉

(兰州交通大学 电子与信息工程学院, 甘肃 兰州 730070)

**摘 要:**针对现有图像去雾算法在天空或高亮区域透射率估计不准确的问题,且复原图像色彩失真以及细节丢失严重等情况,提出了一种基于线性变换的自适应透射率去雾算法。首先,将输入图像转换至YCbCr空间提取亮度分量,并构造反S型函数对其进行尺度压缩,以此减弱高亮像素的影响;然后,利用线性变换模型对压缩后的亮度分量进行增强处理,使用高斯函数对亮度分量进行卷积操作得到自适应控制参数;结合线性变换模型和自适应控制参数逼近无雾图像最小颜色通道操作,进而得到精确的透射率估计值;最后,利用大气散射模型和局部大气光值逆向求解出复原图像。在实验验证中,采用可见边、平均梯度、饱和像素点及结构相似性作为客观评价指标。客观数据表明,所提算法的各项指标均取得优势。在主观效果方面,所提算法可以准确估计出透射率,有效去除图像雾气干扰并改善天空或明亮区域色彩失真的现象,提高图像可视度,复原出更多细节和边缘信息。

**关键词:**图像处理;反S型函数;线性变换;高斯函数;自适应参数

中图分类号:TP391.41

文献标志码:A

文章编号:2096-3246(2020)05-0194-07

## Image Defogging Algorithm for Adaptive Transmission Based on Linear Transformation

YANG Yan, JIANG Peipei, YUE Hui

(School of Electronic and Info. Eng., Lanzhou Jiao Tong Univ., Lanzhou 730070, China)

**Abstract:** In order to solve the deficiencies of existing image defogging algorithms, such as inaccurate estimation of the transmission in the sky or bright areas, image color distortion and serious loss of details, an adaptive transmission defogging algorithm based on linear transformation was proposed. Firstly, the input image was converted to the YCbCr space to extract the brightness component, and an anti-S type function was constructed to reduce the influence of highlighted pixels. Then a linear transformation model is used to enhance the compressed luminance component. In order to obtain an adaptive control parameter, a Gaussian function was adopted to convolve the luminance component. The minimum color channel of the fog-free image was approximated by combining linear transformation model and the adaptive control parameter, and further an accurate estimate of the transmission was obtained. Finally, the restored image was acquired by using the atmospheric scattering model and local atmospheric light in reverse. In the experimental verification part, visible edges, average gradients, saturated pixels, and structural similarity were used as objective evaluation indicators. The objective data illustrated that all indicators of the proposed method achieves better performance. In terms of subjective effects, the proposed algorithm is superior to several existing defogging algorithms. It can accurately estimate the transmission, effectively remove image fog interference and improve the color distortion of the sky or bright areas, improve image visibility, and restore more details such as image edges.

**Key words:** image processing; anti-S type function; linear transformation; Gaussian function; adaptive parameter

在雾、霾等恶劣天气情况下,户外图像系统采集到的图像会受空气中悬浮颗粒和水蒸气液滴等的影响而降质<sup>[1]</sup>,使采集到的图像出现对比度减退、饱和度降低、色彩偏移以及细节大量丢失的现象,严重影响了户外视觉系统对图像的分析,因此对雾天图像

进行清晰化处理具有十分重要的研究意义和价值<sup>[2]</sup>。

对于雾天图像清晰化处理算法研究,主要有3类方法:一是,以直方图均衡化<sup>[3]</sup>、Retinex算法<sup>[4-5]</sup>为代表的图像增强算法。但是,由于图像增强并未完备考虑雾图降质的原因,去雾效果有限。二是,图像复原

收稿日期:2019-12-25

基金项目:国家自然科学基金项目(61561030);甘肃省财政厅基本科研业务费基金项目(214138);兰州交通大学教改基金项目(160012)

作者简介:杨 燕(1972—),女,教授,博士。研究方向:数字图像处理;智能信息处理;语音信号处理。E-mail: yangyantd@mail.lzjtu.cn

网络出版时间:2020-09-15 14:56:20

网络出版地址:https://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1773.TB.20200915.1152.001.html

算法<sup>[6-16]</sup>,目前大部分图像去雾算法都是基于图像复原。例如:He等<sup>[6]</sup>提出暗通道先验算法,并利用软抠图算法消除块状效应,取得了良好的效果,但算法实时性较差。之后,He等<sup>[7]</sup>提出引导滤波算法以改善实时性的问题,但会出现去雾不彻底的现象。Sun等<sup>[8]</sup>提出局部大气光策略,避免由于全局大气光估计不准确所引起的问题,但复原的图像过度饱和,在部分区域出现失真现象。Zhu等<sup>[9]</sup>提出颜色衰减先验算法,通过对有雾图像的景深信息建模并结合机器学习方法训练参数,可以很好地恢复景深信息,提高图像可视度,但仍存在一定程度的残雾。杨燕等<sup>[10]</sup>结合雾浓度模型与指数函数估计透射率,取得了不错的效果,但对于色彩鲜艳的图像,会出现过饱和问题。Yang<sup>[11]</sup>、李炎炎<sup>[12]</sup>、Kim<sup>[13]</sup>等提出针对特定场景的去雾方法,在沙尘、道路等特殊场景下取得了良好的复原效果,但在图像泛化处理方面明显不足。杨燕<sup>[14]</sup>、Hautière<sup>[15]</sup>等为解决大气散射模型的病态问题,提出从有雾图像本身提取信息以构建约束条件的思想,从而获取未知参数,但增加约束条件导致算法应用条件苛刻,难以应对复杂场景下的去雾任务。杨燕等<sup>[16]</sup>提出平面扇形模型约束透射率边界,并利用均值不等关系进行逼近,但对于浓雾图像处理效果不太理想。三是,基于深度学习的方法<sup>[17-20]</sup>。近年来,越来越多的学者通过机器学习训练数据,以获得良好的去雾模型。例如: Cai等<sup>[17]</sup>提出一种可训练的端到端神经网络系统,并通过双边线性修正函数提高复原图像的质量,但该方法模型复杂且数据库有限,并不能适用于所有图像,导致在真实场景中处理效果欠佳。文献<sup>[18-20]</sup>方法同样受限于现有去雾数据集的规模和质量,训练出的模型在真实场景下难以稳定输出较高质量的去雾结果。

图像去雾的过程基本上是一个受限制不足的问题,上述研究一般是通过已知信息进行假设或约束获得所需信息。基于此思路,本文提出一种基于线性变换的算法自适应估计透射率。与其他算法相比,本文算法在天空等高亮区域取得了良好的去雾效果,

且色彩饱和度适宜,具有良好的视觉效果。

## 1 大气散射模型

在图像去雾领域中,广泛应用大气散射模型<sup>[6-16]</sup>描述雾天图像的形成过程,大气散射模型理论最早由McCartney提出,后期由Narasimhan进行演算和逻辑推理,公式如下:

$$I(x) = J(x)t(x) + A(1 - t(x)) \quad (1)$$

式中:  $I(x)$ 为观测到的有雾图像;  $J(x)$ 为复原后的无雾图像;  $t(x)$ 为透射率值;  $A$ 为全局大气光值;  $x$ 为图像像素;  $J(x)t(x)$ 为直接衰减项,即场景入射光在传输介质中因大气粒子的散射作用而衰减的程度;  $A(1 - t(x))$ 为大气光幕亮度,即在成像过程中所加入的大气散射光,它是导致场景模糊和颜色失真的主要原因。

假设大气光值已知,由式(1)可得透射率计算式:

$$t(x) = \frac{A - I(x)}{A - J(x)} \quad (2)$$

## 2 本文算法

YCbCr彩色空间广泛应用于数字视频,单个分量Y通道为亮度信息,两个色差分量Cb和Cr通道为彩色信息,分别是蓝色色度分量和红色色度分量。在有雾天气条件下,大气光幕亮度对RGB、HSV和YCbCr色彩空间中的每个通道分别有一定的影响,但有雾区域主要集中在YCbCr色彩空间中的亮度通道上,而较少集中在色度通道上<sup>[19]</sup>。由此,本文提出一种基于线性变换的自适应透射率去雾算法,算法流程如图1所示。首先,将有雾图像转换至YCbCr空间并提取亮度分量,构造反S型函数对其进行压缩;然后,利用高斯函数构造一个线性变换的自适应参数,并将其引入到线性变换模型中对亮度分量进行处理,获得粗略的透射率估计值;最后,使用交叉双边滤波对粗略透射率进行细化以获得精确透射率估计值。在大气光估计方面,采用Sun等<sup>[8]</sup>提出的局部大气光估计方法,该方法能在一定程度上避免因全局大气光估计不准确导致的复原图像失真的问题。

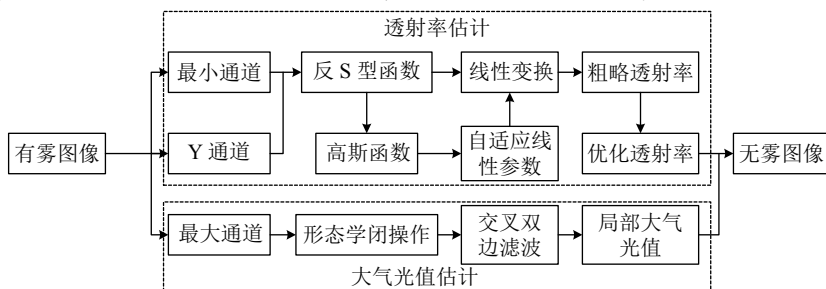


图1 本文算法流程图

Fig. 1 Flow chart of the proposed algorithm

## 2.1 反S型函数

利用Y通道估计透射率值,由RGB空间转换至YCbCr空间进行进一步的处理。针对浓雾图像或近景有白色物体的薄雾图像,图像亮度较高,为减弱高亮像素的影响,通过构造反S型函数对亮度分量进行衰减,函数曲线如图2所示。

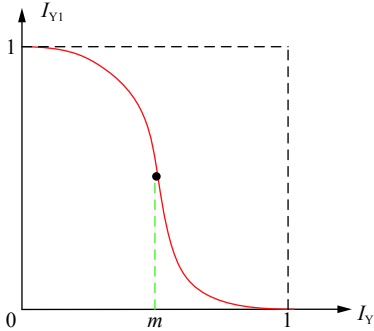


图 2 反S型函数曲线

Fig. 2 Curve of anti-S type function

该函数的表现形式为:

$$I_{Y1}(x) = \frac{1}{1 + (m/I_Y(x) - m)^E} \quad (3)$$

式中:  $I_Y$  为输入图像的Y通道操作(亮度值);  $I_{Y1}$  为输出图像相应的亮度值;  $E$  为控制参数,用于控制该函数的斜率,通过大量实验,设定  $E=2$ ;  $m$  为输入图像的平均灰度级。该函数可以对输入图像的亮度分量进行尺度压缩,消除高亮像素的影响,提高透射率估计的准确性。

## 2.2 线性变换模型

在雾天环境下,雾霾的浓度一般随着场景深度的变化而增加,随着雾浓度的变化,有雾图像中像素的亮度急剧变化。根据线性变换原理,将有雾图像的亮度分量通过指定的线性函数进行变换,近似逼近无雾图像的亮度分量,取坐标轴  $i = I_{Y1}$  为自变量,  $j = J_Y$  为因变量,则有雾图像的亮度分量与无雾图像亮度分量的关系如图3中直线所示。

其数学表达式如下:

$$J_Y(x) = k \times I_{Y1}(x) + d \quad (4)$$

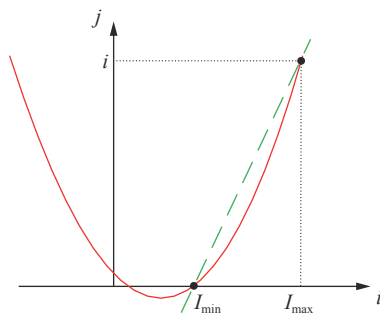


图 3 线性变换曲线

Fig. 3 Curve of linear transformation

式中,  $J_Y$  为无雾图像的Y通道操作,  $I_{Y1}$  为进行衰减后的有雾图像的Y通道操作,  $k$  为直线的斜率,  $d$  为线性函数的截距。由于  $k$  和  $d$  是两个未知数,方程不可解。采用图3中的光滑曲线近似逼近直线,在  $[I_{\min}, I_{\max}]$  范围内,图3中直线可以由分段函数曲线近似表示。即式(4)可以转化为:

$$J_Y(x) = \frac{I_{Y1}(x) - I_{\min}}{I_{\max} - I_{\min}} \times I_{Y1}(x) \quad (5)$$

式中,  $I_{\max}$  和  $I_{\min}$  分别为  $I_{Y1}(x)$  的最大值和最小值。因此,  $0 \leq \frac{I_{Y1}(x) - I_{\min}}{I_{\max} - I_{\min}} \leq 1$ 。

## 2.3 自适应控制参数

在彩色图像中,由于至少有一个颜色分量的反射系数非常小,因此使用最小滤波器计算3个颜色通道的最小值,对式(2)进行最小通道操作,可将透射率表示为:

$$t(x) = \frac{A - \min_{c \in \{R, G, B\}} I_c(x)}{A - \min_{c \in \{R, G, B\}} J_c(x)} \quad (6)$$

式中,  $c$  为有雾图像的颜色通道,  $I_c(x)$  和  $J_c(x)$  分别为有雾图像与无雾图像在RGB 3个颜色通道的分量。为了准确地估计无雾图像最小颜色通道,引入控制参数  $\mu$  ( $0 \leq \mu \leq 1$ ),  $\mu$  值可以控制图3中曲线的弯曲程度,结合线性变换模型逼近无雾图像最小通道操作,进而复原无雾图像,通过参数  $\mu$  控制复原图像的去雾强度,如式(7)所示:

$$t(x) = \frac{A - \min_{c \in \{R, G, B\}} I_c(x)}{A - \mu \times J_Y(x)} \quad (7)$$

图4为不同取值下  $\mu$  值对复原效果的影响。由图4可以看出:  $\mu$  值较小时,复原图像的远景区域去雾彻底,细节丰富,但近景区域过度饱和;  $\mu$  值增大,复原图像的远景区域雾感越来越明显,细节大量丢失,但近景区域复原效果较好,整体色彩自然;  $\mu$  自适应后,近景区域复原效果自然,远景去雾彻底。相比于  $\mu$  取定值,自适应  $\mu$  值能取得更好的效果。

对于同一幅图像选取不同的  $\mu$  值会有不同的效果,在远景浓雾区域选取较小的  $\mu$  值,近景薄雾区域取较大的  $\mu$  值,这与有雾图像亮度分量分布刚好相反,即  $\mu$  与亮度信息呈负相关。采用  $\mu(x)$  自适应调节复原图像质量,根据亮度大小选取合适的值。考虑到亮度分量的平滑和边缘细节问题,采用高斯函数对亮度分量进行卷积操作,即

$$\mu(x) \propto 1 - I_{Y1}(x, y) * G(x, y) \quad (8)$$

$$G(x, y) = N \times \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{\sigma^2}\right) \quad (9)$$



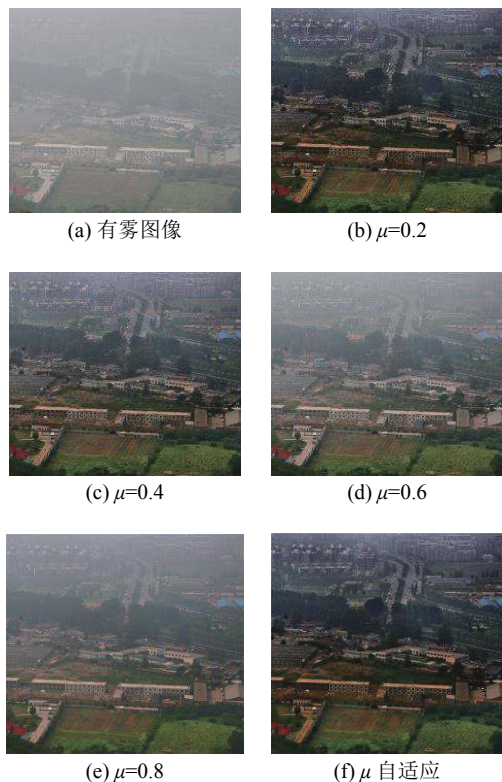


图4 自适应参数比较

Fig. 4 Comparison of adaptive parameters

式(8)、(9)中:  $I_{Y1}(x,y) * G(x,y)$  反映亮度信息;  $G(x,y)$  为高斯滤波函数;  $*$  为卷积操作;  $\sigma$  为滤波半径;  $N$  为归一化常数, 由归一化条件  $N \times \iint G(x,y) dx dy = 1$  确定。因此可以得到透射率的粗略估计:

$$t_1(x) = \frac{A - \min_{c \in \{R,G,B\}} I_c(x)}{A - \mu(x) \times \frac{I_{Y1}(x) - I_{\min}}{I_{\max} - I_{\min}} \times I_{Y1}(x)} \quad (10)$$

## 2.4 优化透射率

由于粗略的透射率会导致纹理效应比较明显, 因此有必要对其进行平滑操作以提高视觉效果。采用交叉双边滤波器<sup>[8]</sup>进行优化处理, 如下:

$$t_2(x) = \text{crob}(t_1(x), I_c(x)) \quad (11)$$

式中,  $\text{crob}$  表示双边滤波器操作, 优化后的透射率有良好的边缘信息, 且局部平滑, 并有效消除了纹理效应。

## 2.5 局部大气光估计

大气光值也是非常重要的一个参数, 其精确性直接影响最终的复原效果。He等<sup>[6]</sup>选取暗通道前0.1%的亮度像素值对应的输入图像的最亮像素值作为大气光值, 但该方法对于包含大片白亮区域的图像, 会导致大气光值误估计; Kim等<sup>[13]</sup>通过四叉树细分法估计大气光值, 该方法虽然鲁棒性强, 但同样也会受白亮区域的干扰。本文选用局部大气光估计策略<sup>[8]</sup>, 可以精确地估计大气光值。具体步骤如下:

- 1) 求取有雾图像最大通道操作;
- 2) 对有雾图像最大通道进行形态学闭操作;
- 3) 使用交叉双边滤波器消除纹理效应并保持边缘信息, 得到局部大气光值  $A(x)$ , 局部大气光求取过程如图5所示。

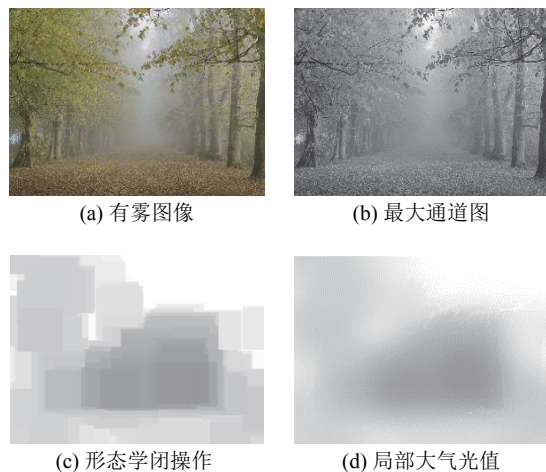


图5 局部大气光求取过程

Fig. 5 Local atmospheric light extraction process

## 3 实验与结果分析

实验在MATLAB R2014Ra环境下仿真实现, 计算机的配置为Intel(R)Core(TM)i7-7500U CPU @2.70 GHz RAM 4.00 GB, 操作系统为64位Windows 10。选取了6幅不同场景下的有雾图像, 进行仿真实验, 将所提算法与经典算法进行比较, 分别从主客观两个方面对复原图像进行评价。

### 3.1 主观评价

主观评价主要是指观测者观察图像, 从人的主观感受评价复原图像的质量, 因此具有一定的局限性, 但可以快速地评定复原图像效果的优劣。分别在薄雾、浓雾和包含明亮区域3个不同场景下的去雾任务将本文算法与其他经典去雾算法进行对比, 分析去雾程度、亮度、色彩保真度、细节信息保持等主观视觉效果。所选经典算法有He等<sup>[6]</sup>算法、Sun等<sup>[8]</sup>算法、Zhu等<sup>[9]</sup>算法以及Cai等<sup>[17]</sup>算法, 对比效果如图6~8所示。

图6(a)为薄雾场景下的有雾图像。由图6(b)~(f)可知: 对于薄雾图像, He等<sup>[6]</sup>算法的复原图像细节增多, 雾气基本去除, 但图像整体偏暗, 在景深交替处有残雾存在; Sun等<sup>[8]</sup>算法的复原图像去雾彻底, 但亮度偏亮, 并且图像中局部区域出现了失真现象; Zhu等<sup>[9]</sup>算法的复原图像饱和度适宜, 但整体色彩偏暗且去雾效果不佳; Cai等<sup>[17]</sup>算法复原的图像整体色彩自然, 效果较好, 但仍存在去雾不彻底的现象; 本文所提算法的复原图像去雾彻底, 细节丰富, 有较好的饱和度和明亮度。

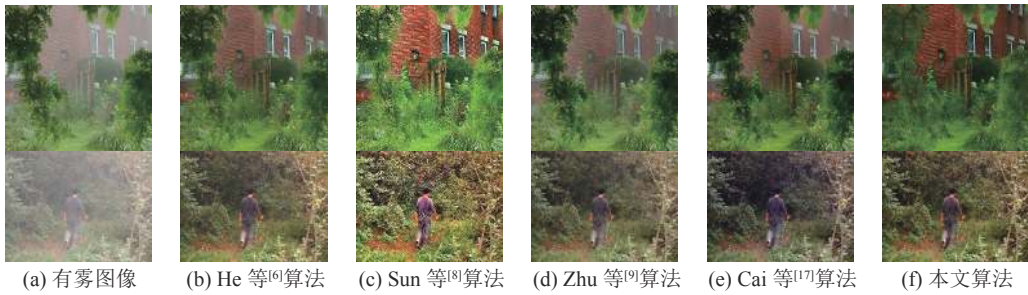


图 6 薄雾图像复原效果对比

Fig. 6 Comparison of mist image restoration effect



图 7 浓雾图像复原效果对比

Fig. 7 Comparison of dense image restoration effect

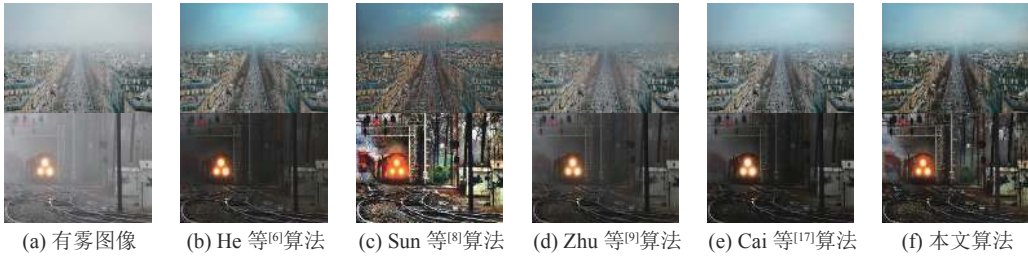


图 8 天空和明亮区域复原效果对比

Fig. 8 Comparison of sky and lightest area restoration effect

图7(a)为浓雾场景下的有雾图像。由图7(b)~(f)可知:对于浓雾图像,He等<sup>[6]</sup>算法、Zhu等<sup>[9]</sup>算法以及Cai等<sup>[17]</sup>算法的复原图像均存在去雾不彻底,图像偏暗的现象;Sun等<sup>[8]</sup>算法的复原图像去雾彻底,细节增多,但图像整体偏色,出现颜色失真现象;本文所提算法的复原图像去雾彻底,景深交替处过渡平滑,边缘保持良好,细节增多,色彩鲜艳。

图8(a)为存在大片天空或明亮区域的有雾图像。由图8(b)~(f)可知:对于包含明亮区域的场景,He等<sup>[6]</sup>算法、Sun等<sup>[8]</sup>算法的复原图像在天空和明亮区域出现了不同程度的失真及偏色现象;Zhu等<sup>[9]</sup>算法、Cai等<sup>[17]</sup>算法虽然在天空和明亮区域处理效果较好,但去雾不彻底,存在残雾;本文所提算法复原图像去雾彻底,在天空和明亮区域色彩自然,复原效果突出。

### 3.2 客观评价

目前,图像去雾算法没有特定的客观评价指标来分析评定,通常使用图像增强算法的客观评价指标,如峰值信噪比、局部对比度和均方误差<sup>[14]</sup>等。除

了这些指标之外,针对图像去雾算法,Hautière等<sup>[15]</sup>提出了针对性的客观评价指标,本文采用新增可见边之比( $e$ )、规范化平均梯度值( $\bar{r}$ )、饱和像素点的百分比( $\delta$ )以及结构相似性(structural similarity, SSIM)表征图像复原效果。其中,用 $S_{ssim}$ 表示SSIM的值, $e$ 、 $\bar{r}$ 和SSIM的值越大越好, $\delta$ 的值越小越好<sup>[17]</sup>。

$$e = \frac{n_r - n_0}{n_0} \quad (12)$$

$$\bar{r} = \exp\left(\frac{1}{n_r} \sum_{P_i \in \psi_r} \ln r_i\right) \quad (13)$$

$$\delta = \frac{n_s}{w \times h} \quad (14)$$

$$S_{ssim} = \frac{(2\lambda_l \lambda_j + R_1)(\chi_{lj} + R_2)}{(\lambda_l^2 + \lambda_j^2 + R_1)(\varphi_l^2 + \varphi_j^2 + R_2)} \quad (15)$$

式(12)~(15)中, $n_0$ 和 $n_r$ 分别为有雾图像和无雾图像的可见边数, $r_i$ 为 $P_i$ 处的梯度与有雾图像在此处梯度之比, $P_i$ 为可见边上的像素点, $\psi_r$ 为无雾图像的可见边集合, $n_s$ 为饱和像素点个数, $w$ 和 $h$ 分别为图像的宽

和高,  $\lambda_l$ 和 $\lambda_f$ 分别为有雾图像和复原图像的均值,  $\varphi_l$ 和 $\varphi_f$ 分别为有雾图像与复原图像的方差,  $\chi_{ll}$ 为协方差,  $R_1$ 、 $R_2$ 为常数。指标 $e$ 、 $\bar{r}$ 和 $\delta$ 分别从边缘信息、梯度信息及饱和像素点个数变化评测局部对比度; SSIM主要衡量有雾图像与复原图像之间的结构相似性,

反映场景的结构信息, 这4个指标能够有效地评价去雾算法。在图6(a)、7(a)、8(a)所示3个场景下, 使用He等<sup>[6]</sup>算法、Sun等<sup>[8]</sup>算法、Zhu等<sup>[9]</sup>算法、杨燕等<sup>[16]</sup>算法、Cai等<sup>[17]</sup>算法以及本文所提算法得到上述4个指标, 取平均值进行对比, 如图9所示。

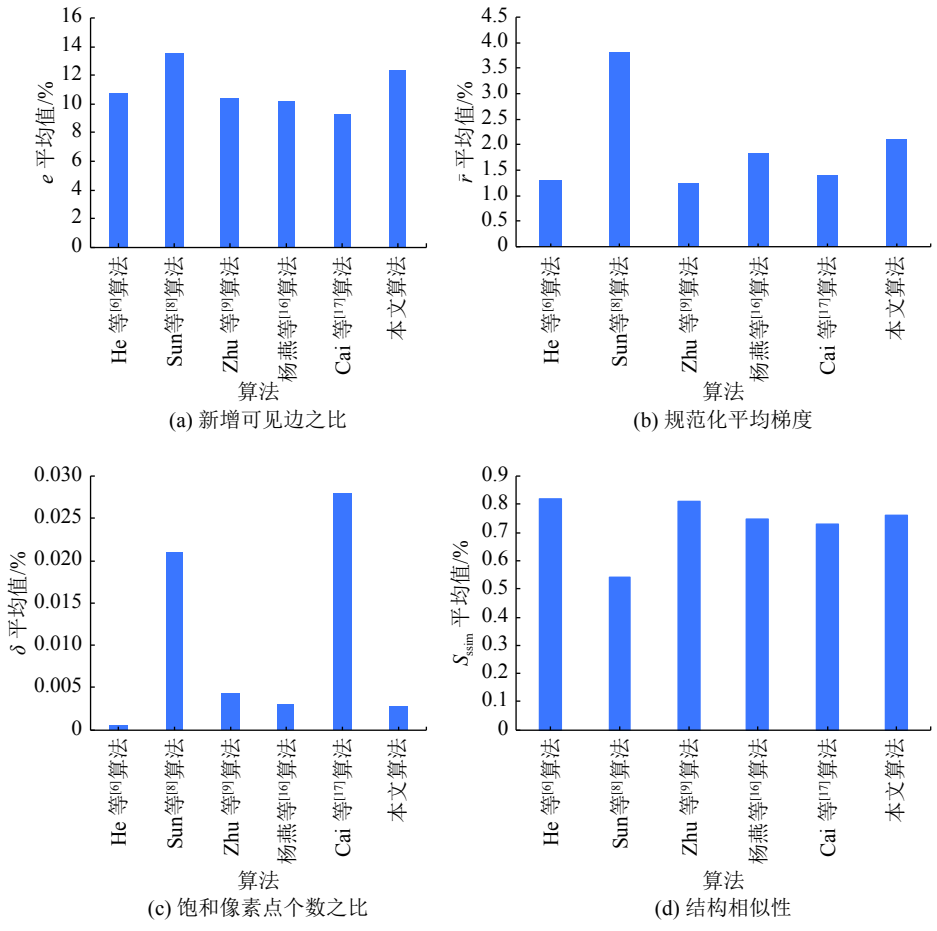


图 9 客观评价结果

Fig. 9 Results of objective evaluation

由图9可以看出: He等<sup>[6]</sup>算法虽然在 $\delta$ 及SSIM方面优于本文所提算法, 但其 $e$ 和 $\bar{r}$ 不及所提算法; Sun等<sup>[8]</sup>算法在 $e$ 和 $\bar{r}$ 方面取得了优异的效果, 但其具有过高的饱和像素点值, 在SSIM方面表现不佳; Zhu等<sup>[9]</sup>算法在SSIM方面表现良好, 但其他3个指标的结果不佳; 杨燕等<sup>[16]</sup>算法在 $e$ 和 $\bar{r}$ 方面不及本文所提算法, 在 $\delta$ 及SSIM方面与本文所提算法表现相当; Cai等<sup>[17]</sup>算法在SSIM方面跟本文所提算法差不多, 但 $e$ 、 $\bar{r}$ 都不及本文所提算法, 而且 $\delta$ 过高; 本文所提算法与上述经典算法相比,  $e$ 平均提高10%,  $\bar{r}$ 平均提高0.5,  $\delta$ 平均减少1.2%, SSIM平均提高12%。综合各项指标, 本文所提算法具有较高的图像局部对比度及色彩保真度。

3.3 运行时间对比

为了进一步验证所提算法的有效性, 记录了基于He等<sup>[6]</sup>算法、Sun等<sup>[8]</sup>算法、Zhu等<sup>[9]</sup>算法、杨燕等<sup>[16]</sup>

算法、Cai等<sup>[17]</sup>算法以及本文所提算法复原真实场景图像的运行时间, 并计算得到平均时间, 如表1所示。

表 1 不同算法的平均运行时间

| Tab. 1 Average running time of different algorithms |                       |                        |                        |                        |                         |      |
|-----------------------------------------------------|-----------------------|------------------------|------------------------|------------------------|-------------------------|------|
| 算法                                                  | He等 <sup>[6]</sup> 算法 | Sun等 <sup>[8]</sup> 算法 | Zhu等 <sup>[9]</sup> 算法 | 杨燕等 <sup>[16]</sup> 算法 | Cai等 <sup>[17]</sup> 算法 | 本文算法 |
| 平均运行时间/s                                            | 2.86                  | 1.88                   | 0.79                   | 1.65                   | 2.81                    | 1.63 |

由表1可知: 本文所提算法的运行时间相对较低, 大约是He等<sup>[6]</sup>算法和Cai等<sup>[17]</sup>算法的1/2, 其原因是He等<sup>[6]</sup>算法通过引入引导滤波器以消除Halo效应, 这样会增加额外的时间消耗, Cai等<sup>[17]</sup>算法多次使用非线性滤波会增加运行时间。本文所提算法与Sun等<sup>[8]</sup>算法和杨燕等<sup>[16]</sup>算法的运行时间差不多, 而比Zhu等<sup>[9]</sup>算法的运行时间慢, 这是因为在本文的透射率估计过程中涉及图像的预处理以及较少的非线性运算会



增加运行时间。本文所提算法运行时间较短,且复原效果较好。

## 4 结 论

本文提出一种基于线性变换的自适应透射率图像去雾算法,在降质图像中,有雾区域主要集中在 YCbCr 色彩空间中的亮度通道上。通过构造反 S 型函数将有雾图像亮度分量值进行衰减,利用线性变换函数对亮度分量作增强处理逼近无雾图像亮度分量;自适应调整相关参数,使其根据不同的雾浓度自适应的调节无雾图像的亮度分量,进而估计出透射率。在实验中,从主客观两个方面验证了本文所提算法的有效性。主观评价中,本文所提算法的复原图像雾气去除彻底,细节丰富,颜色更自然,图像整体亮度较高;在客观评价中也有一定的优势。但是,本文算法仍有不足之处:一是,对沙尘雨雪等天气不适用;二是,不能对视频图像进行清晰化处理;后续将对算法进一步进行优化处理。

### 参考文献:

- [1] Wang Wencheng, Yuan Xiaohui, Wu Xiaojin, et al. Fast image dehazing method based on linear transformation[J]. *IEEE Transactions on Multimedia*, 2017, 19(6): 1142–1155.
- [2] Kim J Y, Kim L S, Hwang S H. An advanced contrast enhancement using partially overlapped sub-block histogram equalization[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 2001, 11(4): 475–484.
- [3] Liu Guo, Lu Qunbo, Liu Yangyang. Single image dehazing algorithm based on adaptive dark channel prior[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, 47(2): 173–180. [刘国, 吕群波, 刘扬阳. 基于自适应暗原色的单幅图像去雾算法[J]. *光子学报*, 2018, 47(2): 173–180.]
- [4] Li Changli, Zhou Xiaoxiao, Zhang Zhen, et al. Haze image enhancement based on fusion strategy in Retinex model[J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2018, 50(5): 202–208. [李昌利, 周晓晓, 张振, 等. Retinex 模型下基于融合策略的雾霾图像增强[J]. *工程科学与技术*, 2018, 50(5): 202–208.]
- [5] Zhang Chi, Tan Nanlin, Li Xiang, et al. Foggy image enhancement technology based on improved Retinex algorithm[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2019, 45(2): 309–316. [张驰, 谭南林, 李响, 等. 基于改进型 Retinex 算法的雾天图像增强技术[J]. *北京航空航天大学学报*, 2019, 45(2): 309–316.]
- [6] He Kaiming, Sun Jian, Tang Xiaoou. Single image haze removal using dark channel prior[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2011, 33(12): 2341–2353.
- [7] He Kaiming, Sun Jian, Tang Xiaoou. Guided image filtering[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2013, 35(6): 1397–1409.
- [8] Sun Wei, Wang Hao, Sun Changhao, et al. Fast single image

haze removal via local atmospheric light veil estimation[J]. *Computers & Electrical Engineering*, 2015, 46: 371–383.

- [9] Zhu Qingsong, Mai Jiaming, Shao Ling. A fast single image haze removal algorithm using color attenuation prior[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2015, 24(11): 3522–3533.
- [10] Yang Yan, Liu Longlong, Zhang Dexin, et al. Fast single image dehazing combined with adaptive haze estimation[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2019, 27(10): 2263–2271. [杨燕, 刘珑珑, 张得欣, 等. 结合自适应雾气估计的快速单幅图像去雾[J]. *光学精密工程*, 2019, 27(10): 2263–2271.]
- [11] Yang Yan, Zhang Chen, Liu Longlong, et al. Visibility restoration of single image captured in dust and haze weather conditions[J]. *Multidimensional Systems and Signal Processing*, 2020, 31(2): 619–633.
- [12] Li Yanyan, Du Yulong, Long Wei, et al. Self-adaptive defogging algorithm for vehicle video with automatic estimation of visibility[J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2019, 51(3): 192–197. [李炎炎, 杜玉龙, 龙伟, 等. 基于无参考图像获取能见度的车载视频自适应去雾算法[J]. *工程科学与技术*, 2019, 51(3): 192–197.]
- [13] Kim J H, Jang W D, Sim J Y, et al. Optimized contrast enhancement for real-time image and video dehazing[J]. *Journal of Visual Communication and Image Representation*, 2013, 24(3): 410–425.
- [14] Yang Yan, Chen Gaoke, Zhou Jie. Iterative optimization defogging algorithm using Gaussian weight decay[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2019, 45(4): 819–828. [杨燕, 陈高科, 周杰. 基于高斯权重衰减的迭代优化去雾算法[J]. *自动化学报*, 2019, 45(4): 819–828.]
- [15] Hautière N, Tarel J P, Aubert D, et al. Blind contrast enhancement assessment by gradient ratioing at visible edges[J]. *Image Analysis & Stereology*, 2008, 27(2): 87–95.
- [16] Yang Yan, Wang Zhiwei. Adaptive image dehazing algorithm based on mean unequal relation optimization[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2020, 42(3): 755–763. [杨燕, 王志伟. 基于均值不等关系优化的自适应图像去雾算法[J]. *电子与信息学报*, 2020, 42(3): 755–763.]
- [17] Cai Bolun, Xu Xiangmin, Jia Kui, et al. DehazeNet: An end-to-end system for single image haze removal[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2016, 25(11): 5187–5198.
- [18] Hodges C, Bennamoun M, Rahmani H. Single image dehazing using deep neural networks[J]. *Pattern Recognition Letters*, 2019, 128: 70–77.
- [19] Wang Anna, Wang Wenhui, Liu Jinglu, et al. AIPNet: Image-to-image single image dehazing with atmospheric illumination prior[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2019, 28(1): 381–393.
- [20] Ren Wenqi, Liu Si, Zhang Hua, et al. Single image dehazing via multi-scale convolutional neural networks[M]//Computer Vision—ECCV 2016. Cham: Springer, 2016: 154–169.

(编辑 赵 婧)

引用格式: Yang Yan, Jiang Peipei, Yue Hui. Image defogging algorithm for adaptive transmission based on linear transformation[J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2020, 52(5): 194–200. [杨燕, 姜沛沛, 岳辉. 基于线性变换的自适应透射率去雾算法[J]. *工程科学与技术*, 2020, 52(5): 194–200.]