

周研, 于萍. 基于灰度特征值分割的暗通道先验去雾增强算法[J]. 智能计算机与应用, 2024, 14(7): 71-78. DOI: 10.20169/j.issn.2095-2163.240710

基于灰度特征值分割的暗通道先验去雾增强算法

周研, 于萍

(吉林师范大学 数学与计算机学院, 吉林 四平 136000)

摘要: 暗通道先验算法去雾的效果较好, 但是去雾后的图像普遍存在光晕现象和亮度偏低等问题。基于双边滤波的多尺度 Retinex 算法去雾的效果一般, 但是可以提高图像的亮度和清晰度, 因此本文提出基于灰度特征值分割的暗通道先验去雾增强算法, 首先基于灰度特征值分割天空区域来更好的求出大气光值; 其次, 改进透射率模型后用引导滤波对其进行细化; 最后, 用容差值对亮区域的透射率进行调整。去雾后的图像利用基于双边滤波的多尺度 Retinex 算法提高图像的亮度和清晰度, 用 sigmoid 函数调整对比度, 最后线性拉伸得到最后的增强图像。实验结果表明, 基于灰度特征分割的暗通道先验去雾增强算法可使图像具有更好的视觉效果, 图像的亮度、清晰度较好, 细节保留也更加完整。

关键词: 暗通道; 分割天空区域; 改进透射率; 增强图像

中图分类号: TP317.4

文献标志码: A

文章编号: 2095-2163(2024)07-0071-08

Dark channel prior defogging enhancement algorithm based on gray scale eigenvalue segmentation

ZHOU Yan, YU Ping

(School of Mathematics and Computer Science, Jilin Normal University, Siping 136000, Jilin, China)

Abstract: The prior algorithm of dark channel has a better effect on fog removal, but there are some problems in the image after removing fog, such as halo phenomenon and low brightness. And the effect of multi-scale Retinex algorithm based on bilateral filtering is not good, but can improve the brightness and clarity of the image. Therefore, in this paper, we propose an enhanced algorithm of dark channel prior defogging based on gray-scale eigenvalue segmentation, firstly, the algorithm divides the sky region based on the gray level eigenvalue to get the atmospheric light value, then the transmittance model is improved, it is then refined by the guiding filter, finally, the transmittance of the bright region is adjusted by the tolerance value. The brightness and clarity of the defogged image are improved by using the multi-scale Retinex algorithm based on bilateral filtering, then adjust the contrast using the sigmoid function, finally, the final image is obtained by linear stretching. The experimental results show that, Gray-level feature segmentation based prior enhancement algorithm for Dark Channel defogging can make the image have better visual effect, the brightness and clarity of the image are better, the details are more complete.

Key words: dark channel; divide the sky region; improved transmittance; enhance image

0 引言

近年来, 环境污染问题日益突出, 汽车尾气和工业废气的排放等导致了严重的雾霾天气, 不仅给人们的日常生活带来了极大的不便, 也对获取图像有用信息造成了很大的阻碍, 图像去雾已成为图像识别的一个重要发展方向, 越来越多的研究者开始着手进行图像去雾算法的研究。

目前, 去雾算法主要有 3 大类: 第一类是基于物理模型的图像去雾算法, 主要依据雾天形成的原因反推导出无雾图像。如 He 等^[1]提出的暗通道先验去雾算法, 去雾效果理想, 但复杂度偏高; 后来 He 等^[2]提出引导滤波解决了该问题; 此外, 蒋建国等^[3]发现暗通道先验算法在图像的明亮区域容易出现色彩失真, 提出通过设置容差值的方法, 但图像的亮度和清晰度不高。第二类是通过提高图像的对比度进而实现图像增强的目的。如朱雪俊^[4]设计

作者简介: 周研(2000-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向: 图像去雾。

通讯作者: 于萍(1979-), 女, 博士, 教授, 主要研究方向: 计算机软件与应用。Email: jlsdyp@126.com

收稿日期: 2023-05-18

了暗适应参数与明适应参数,实现低对比度图像全局增强,增强低对比度图像的细节,减小了失真;周辉奎^[5]提出直方图的自适应加权系数,通过对直方图加权进行直方图均衡化处理,实现图像增强;张宝菊等^[6]提出了一种基于 HSV 空间的 Retinex 算法,处理后的图像有效改善了低照度图像的质量,达到较好的视觉效果。常见的图像增强算法主要有白平衡算法、直方图均衡化、Retinex 算法^[7]、多尺度 Retinex 算法^[8] (Multi-Scale-Retinex, MSR) 和基于双边滤波的多尺度 Retinex 算法^[9] (Bilateral-Filtering-Multi-Scale-Retinex, BFMSR)。此类算法在去雾时视觉效果较为明显,但却通常存在图像的颜色过度饱和,继而造成图像部分信息丢失等问题。第三类是基于深度学习的图像去雾算法,主要通过生成的网络结构去训练有雾图像,从而得到无雾的图像。如苏欣宇等^[10]提出一种基于循环生成对抗网络合成方法,将得到的数据集进行去雾训练,解决了图像颜色失真和去雾不彻底的问题;Xiao^[11]设计的卷积神经网络能够从给定的模糊图像中去除残留图像,为后续的去雾处理提供了基础,在生成最终的去雾图像之前应用引导滤波器,增加了结果图像的真实性;Chen 等^[12]提出 GCANet 网络,利用平滑扩张卷积消除卷积过程的晕轮效应,并使用门控子网整合不同尺度的特征,以实现去雾效果。此类算法效果较好,但是其网络复杂度往往过高。

针对以上问题,本文提出了一种基于灰度特征值分割的暗通道先验去雾增强。首先,分割天空区域,对天空区域进行大气光的求值;其次,改进了透射率模型后用引导滤波细化透射率,再利用容差值对亮区域进行透射率优化,去除噪声干扰。通过大气散射物理模型复原出无雾图像,通过 BFMSR 算法平滑去雾图像,采用 sigmoid 函数调整图像对比度,提高图像的亮度和清晰度。最后,对图像进行线性拉伸,避免出现图像过亮或过暗的现象,从而解决去雾后图像的亮度和清晰度偏低等问题。

1 基本原理

1.1 大气散射物理模型

在有雾的天气下的大气散射物理模型,获得的有雾图像数学公式如公式(1)所示:

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

其中, J 为所求的清晰图像; A 为大气光的值; t 为透射率; x 为像素点的坐标。

1.2 暗通道先验理论

He 等^[1]通过观察大量的图像,发现图像在某些区域(除了天空区域之外)的亮度值很低,其值接近于 0,用这一发现来估计雾的厚度,进而求出清晰的无雾图像。对于任意一幅图像 J ,其暗通道的定义如公式(2)所示:

$$J^{\text{dark}}(x) = \min_{c \in \{r, g, b\}} (\min_{y \in \Omega(x)} (J^c(y))) \quad (2)$$

其中, r, g, b 为图像的 3 个通道, $\Omega(x)$ 表示以像素点 x 为中心的方形区域。

1.3 求解透射率

首先,认定大气光 A 是一个常数,对等式(1)两边执行最小化运算,可以得到公式(3):

$$\min_{y \in \Omega(x)} (I^c(y)) = \min_{y \in \Omega(x)} (J^c(y))t(x) + A^c(1 - t(x)) \quad (3)$$

其中, c 为颜色通道, $c \in \{r, g, b\}$ 。

对公式(3)两边同除 A^c ,可以得到公式(4):

$$\min_{y \in \Omega(x)} \left(\frac{I^c(y)}{A^c} \right) = \min_{y \in \Omega(x)} \left(\frac{J^c(y)}{A^c} \right) t(x) + (1 - t(x)) \quad (4)$$

3 个颜色通道分别对公式(4)采取最小运算,可以得到公式(5):

$$\min_c (\min_{y \in \Omega(x)} \left(\frac{I^c(y)}{A^c} \right)) = \min_c (\min_{y \in \Omega(x)} \left(\frac{J^c(y)}{A^c} \right)) t(x) + (1 - t(x)) \quad (5)$$

根据暗通道先验算法可知, J^{dark} 的值非常小,趋近于 0,所以公式(2)的值等于 0,由此可以得到公式(6):

$$J^{\text{dark}}(x) = \min_c (\min_{y \in \Omega(x)} (J^c(y))) = 0 \quad (6)$$

A^c 是一个常数,所以通过公式(4)和公式(6)可以得出公式(7):

$$\min_c (\min_{y \in \Omega(x)} \left(\frac{J^c(y)}{A^c} \right)) = 0 \quad (7)$$

把公式(7)带入公式(5),可以得到粗略的透射率 t ,如公式(8)所示:

$$t(x) = 1 - \min_c (\min_{y \in \Omega(x)} \left(\frac{I^c(y)}{A^c} \right)) \quad (8)$$

如果把图像完全去雾,图像看起来就会不自然,因此设置了一个参数 ω ,用来保留图像的部分雾,取值范围介于 0~1 之间,带入公式(8)中可得出最终的透射率的公式,如公式(9)所示:

$$t(x) = 1 - \omega \min_c (\min_{y \in \Omega(x)} \left(\frac{I^c(y)}{A^c} \right)) \quad (9)$$

1.4 大气光值的估计

首先,在暗通道中选取 m 个像素点,记录其坐标,然后在原图像中找到对应的像素点,并从中选取

最大值作为 A 的值。

将求出的 A 和 t 的值代入公式(1)中, 求出相应的无雾图像, $J(x)$ 表达式如公式(10)所示:

$$J(x) = \frac{I(x) - A}{\max(t(x), t_0)} + A \quad (10)$$

其中, 为了避免 t 的值等于 0, 为其设置一个下限 t_0, t_0 的取值为 0.1。

2 本文算法

2.1 本文算法具体流程

本文算法流程图如图 1 所示。



图 1 算法流程图

Fig. 1 Flowchart of the algorithm

(1) 分割天空区域: 将输入的图像通过计算梯度信息、RGB 差值和亮度平均值三者的平均值得到全局特征均值, 利用全局特征均值作为阈值分割出天空区域;

(2) 估计大气光值: 为了避免传统的暗通道算法在大气光值中选取图像最亮的点造成大气光值估计不准确的现象, 本文在分割出的天空区域中选取天空区域最亮的 0.1% 像素的坐标, 并分别从这些像素位置获取每个 RGB 颜色通道的最大值作为估计的大气光值;

(3) 改进透射率: 为了避免透射率值偏大从而导致光晕现象, 本文构建了一个透射率模型对 R、G、B 3 个通道分别进行处理, 再取其平均值, 再用引导滤波对其进行细化处理, 最后针对亮区域通过容差值调整透射率得到最后优化后的透射率;

(4) 得到去雾图像: 通过大气散射物理模型求出无雾图像;

(5) 图像增强: 将去雾后的图像通过 BFMSR 算法进行平滑滤波处理, 得到反射图像, 再采用 sigmoid 函数对反射图像调整对比度, 将图像进行线性拉伸得到最后的增强图像。

2.2 基于灰度特征值分割天空区域

在传统的暗通道去雾算法的去雾过程中, 由于大气光值的选取是在暗通道图像的最亮的像素对应原始图像的最高亮度点的值, 这时大气光值的选取会受到一些非天空区域的白色物体的影响, 从而使估计的大气光值过高, 最终使复原出来的去雾图像质量不高。为了复原出更清晰明亮的无雾图像, 本文对天空区域进行分割, 进一步提高图像质量。

首先, 将灰度图像进行梯度运算, 求出灰度图像的梯度, 生成梯度图, 设置一个阈值 $\gamma = 0.03$ 来初步判断是否为平滑区域, 其中天空区域属于平滑区域, 也就是梯度小的部分; 其次, 计算出天空区域像素 R、G、B 通道差值, 从而得出 RGB 差值, 将图像转到 HSV 颜色空间中, 计算出图像像素的平均亮度; 最后, 将梯度信息、RGB 差值和平均亮度取平均值, 得到全图的特征均值 Feature, 取 $\text{Feature} \times \beta$ 作为阈值从而分割出天空区域, 本文 β 的取值为 1.2。天空区域分割图如图 2 所示。



(a) 原图像 (b) 天空区域分割图像

图 2 天空区域分割图

Fig. 2 Sky region segmentation

2.3 估计大气光值

根据图像分割为天空区域和非天空区域的结果, 本文将选定在天空区域最亮的 0.1% 像素的坐标, 并分别从这些像素位置获得每个 RGB 颜色通道中的最高强度值。将 R、G、B 通道的这 3 个强度值作为大气光 A , 因此, A 是一个 3×1 的矢量矩阵。

2.4 改进透射率

由于采用最小值滤波计算得到的暗通道会出现明显的方块效应, 导致去雾后图像在景深突变处残留雾霾, 并可能出现光晕或伪影。针对以上问题, 为了获得更加精确的透射率, 得到更高质量的去雾图像, 本文构建了一个透射率模型, 将输入图像 R、G、B 3 个通道分别进行处理, 再取其平均值, 从而避免了传统暗通道算法中取其最小值造成像素值过低导致透

射率偏大的问题。改进后的透射率如公式(11)所示:

$$t(x) = 1 - \frac{\omega \sum_1^3 \frac{I^c}{A^c}}{3} \quad (11)$$

其中, c 为颜色通道, $c \in \{r, g, b\}$, ω 的取值0.95。



(a) 传统暗通道算法的透射率图像



(b) 本文改进后的透射率图像



(c) 改进后用引导滤波细化后的透射率图像

图3 改进后的透射率图

Fig. 3 Improved transmittance map

2.5 图像复原

蒋建国等^[3]发现图像在亮区域和其他区域的透射率的值都是相同的,导致去雾后的图像在亮区域的颜色差值较大,经常出现失真现象,通过设置容差值 K 可以解决该问题。对于小于 K 值的部分定义为明亮区域,重新计算其透射率;对于大于 K 值的部分,其透射率的值保持不变;当 $K = 0$ 时,为原来的暗通道先验算法。需要注意的是 K 的取值并不唯一,是依据具体的情况而设定的。修改公式(10)为公式(12):

$$J(x) = \frac{I(x) - A}{\min(\max(\frac{K}{|I(x) - A|}, 1), \max(t(x), t_0), 1))} + A \quad (12)$$

本文经过多次实验发现当取值为 0.5 时,去雾后的效果图较好,图片中没有出现颜色失真的现象并且亮度也有所提高。

其中, K 为容差值。

本文经过多次实验发现当 K 取值为 0.5 时,去雾后的效果图较好,图片中没有出现颜色失真的现象并且亮度也有所提高,如图4所示。



(a) 原图像



(b) 去雾图像



(c) 引用容差值后的去雾图像

图4 去雾效果图

Fig. 4 Defogging effect diagram

2.6 图像增强

2.6.1 基于双边滤波的多尺度 Retinex 优化算法

双边滤波平滑图像时,既可以保留图像边缘信息又可以去除噪声的干扰,在平滑时不仅考虑了中心像素点的值域信息还考虑了空域信息,而且对于离中心像素点较远的像素点通常不给予考虑,所以处理后的图像不会出现整体模糊进而导致丢失边缘信息的现象。其权重系数计算方法如公式(13)所示:

$$G(x, y) = \exp \left[-\frac{(x - x_c)^2 + (y - y_c)^2}{2\sigma_s^2} \right] \times \exp \left[-\frac{(f(x, y) - f(x_c, y_c))^2}{2\sigma_r^2} \right] \quad (13)$$

其中, σ_s 为空域函数标准差; σ_r 为值域函数标准差; (x_c, y_c) 为中心的坐标。

多尺度 Retinex 算法是基于色彩恒常性理论的 Retinex 算法的一个分支,广泛应用于图像增强。MSR 算法通常采用 3 个高斯环绕尺度,优点是可以保证图像的边缘信息和色彩信息的完整以及平衡色彩,缺点是不能减少噪声的干扰,所以图像经常出现色彩失真现象^[13-15]。

本文用双边滤波代替 MSR 算法的中心环绕函数,将两种算法加以结合,用于实现图像增强,使图像有更好的视觉效果。由 Retinex 算法可知,一幅图像 $S(x, y)$ 可以看作由两部分的乘积组成,一部分是照度图像 $L(x, y)$, 一部分是反射图像 $R(x, y)$,

图像的计算方法如公式(14)所示:

$$S(x,y) = R(x,y)L(x,y) \quad (14)$$

在图像信息中,照度图像是由照射光源决定的,而反射图像是由自身反射决定的,为了方便运算,将公式(14)转换到对数领域,如公式(15)所示:

$$R(x,y) = \log S(x,y) - \log(S(x,y) * F(x,y)) \quad (15)$$

其中, $F(x,y)$ 为中心环绕函数,其作用是得到照度图像,“*”为卷积符号。

在公式(15)的基础上可以得到 MSR 算法的计算方法,如公式(16)所示:

$$R(x,y) = \sum_{i=0}^K w_i (\log S(x,y) - \log(S(x,y) * F(x,y))) \quad (16)$$

其中, w_i 表示尺度的权重因子, K 表示尺度的数目,这里取值为 3。

将双边滤波算子带入公式(16)中,可得到基于双边滤波的多尺度 Retinex 算法 (BFMSR) 的公式,如公式(17)所示:

$$R(x,y) = \sum_{i=0}^K w_i (\log S(x,y) - \log(G_i(x,y) * S(x,y))) \quad (17)$$

其中, $G_i(x,y)$ 为采用双边滤波算法的中心环绕函数。

2.6.2 sigmoid 函数

sigmoid 函数可以实现图像的对比度调整,在一定程度上可以代替对比度拉伸,对于得到反射图像 R , 本文对其进行 sigmoid 函数增强,如公式(18)所示:

$$R = \frac{1}{1 + e^{-R}} \quad (18)$$

2.6.3 线性拉伸

由于 MSR 算法压缩了图像的动态 sigmoid 函数范围,所以要对得到的图像进行线性拉伸,使图像的像素值分布在 $[0 \sim 255]$ 之间,设 RS 为增强后的图像。线性拉伸算法的具体步骤如下:

(1) 确定增强后图像 RS 中的最小值(min)和最大值(max),即遍历图像的每个像素,记录下最小和最大的像素值;

(2) 对图像进行线性拉伸,如公式(19)所示,使得像素值分布在 $0 \sim 255$ 的范围内;

$$RS_{\text{new}} = \frac{RS - \min}{\max - \min} \quad (19)$$

(3) 对步骤 2 中的结果进行直方图自适应调整,增强图像的对比度和细节。

3 实验与结果分析

本文实验在 64 位操作系统的普通 PC 机上进行。实验环境:系统内存为 8 GB,处理器为 Intel (R) Core(TM) i7-6700 CPU @ 3.40 GHz,算法运行的软件为 Matlab2016。

3.1 主观评价

为了验证本文所提出算法的效果,将本文算法与 HE^[1]、Cho^[16]、Zhu^[17] 和 Ehsan^[18] 的算法进行对比实验,具体的参数设置如下: $\omega = 0.95$, $\sigma_{r1} = 1$, $\sigma_{r2} = 5$, $\sigma_{r3} = 10$, $\sigma_{s1} = 15$, $\sigma_{s2} = 80$, $\sigma_{s3} = 250$,权重 w_i 均取值为 $1/3$,容差值 K 的取值为 0.5,实验中选取的图像主要来源于网络,主观视觉效果对比结果为图 5~图 7 所示。

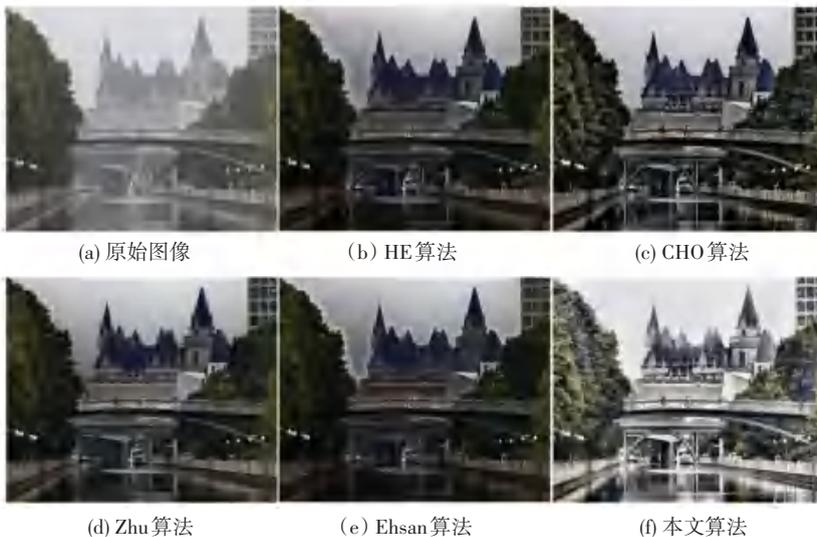


图 5 实验结果对比

Fig. 5 Comparison of experimental results



图6 实验结果对比

Fig. 6 Comparison of experimental results



图7 实验结果对比图

Fig. 7 Comparison of experimental results

由图5可见,He 算法处理后的图像色彩过深,图像整体偏暗,且在天空区域中出现了明显的光晕现象;Cho 算法处理后的图像整体去雾效果较好,但

是图像整体呈现较暗,细节不清晰,出现失真;Zhu 算法处理后的图像整体饱和度偏低,天空区域有明显的黑色伪影,图像右下方的石柱颜色过暗;Ehsan

算法处理后的图像出现明显失真,且天空交界处产生了光晕效应;本文算法处理后的图像整体亮度相较于其他算法更高,细节更加清晰,图像下方的湖面和右下方的石柱细节更加清晰。

由图6可见,He算法和Ehsan算法处理后的图像由于图像本身光线不足使增强后的图像整体偏暗,导致信息丢失严重,效果并不理想;Cho算法处理后的图像整体去雾效果较好,但是图像有明显噪点;Zhu算法处理后的图像整体饱和度偏低,在山脉和天空的交际处颜色出现失真;本文算法处理后的图像整体亮度相较于其他算法更高,在天空区域没有出现光晕现象,山脉的细节保留度也更高。

由图7可见,He算法处理后的图像天空区域出现明显的光晕现象,图像整体亮度偏低;Cho算法处理后的图像去雾效果较好,但整体饱和度过高图像颜色偏暗;Zhu算法处理后的图像天空区域出现明显的光晕现象,且图像右方的汽车细节不清晰;Ehsan算法处理后的图像天空区域出现明显的光晕

现象,图像整体偏暗导致信息丢失严重;本文算法处理后的图像更自然,去雾也更加彻底,且能保留更多细节信息。

3.2 客观评价

为了更好地分析对比各种算法得到的去雾图像质量,本文选取峰值信噪比(Peak Signal-to-Noise Ratio, PSNR)、结构相似性(Structural Similarity, SSIM)、信息熵(Information Entropy, IE)和平均梯度(Average Gradient, AG)4个评价指标评估算法。峰值信噪比表示图像的失真程度以及降噪程度,值越大,表示图像的失真程度越小,噪声越少^[19];结构相似性对两幅图像的亮度、对比度和结构3个方面进行评价,其值越高,表示图像的质量越好;信息熵表示图像的信息量,其值越大,表示图像有用信息越多,复原质量越好;平均梯度表示图像的细节质量,其值越大,表示图像的细节轮廓越清楚,算法的细节保持特性越好^[20]。结果见表1~表3,可以看到本文算法中峰值信噪比、结构相似性、信息熵和平均梯度值均高于其他算法。

表1 图5各算法客观评价指标结果

Table 1 Objective evaluation index results of each algorithm of Fig.5

评价参数	He	Cho	Zhu	Ehsan	本文算法
PSNR	62.022 4	61.441 6	61.357 9	50.433 9	64.430 4
SSIM	0.994 0	0.993 5	0.993 1	0.922 2	0.997 5
信息熵	7.286 6	7.519 6	7.130 8	6.901 1	7.669 9
平均梯度	5.739 2	10.927 0	7.044 9	6.169 9	14.541 9

表2 图6各算法客观评价指标结果

Table 2 Objective evaluation index results of each algorithm of Fig.6

评价参数	He	Cho	Zhu	Ehsan	本文算法
PSNR	60.997 2	61.904 8	61.082 7	51.090 8	64.314 5
SSIM	0.992 8	0.994 5	0.992 9	0.933 5	0.997 4
信息熵	7.395 9	7.767 8	7.373 6	7.241 7	7.797 0
平均梯度	5.849 4	12.185 8	7.211 2	6.390 4	14.124 7

表3 图7各算法客观评价指标结果

Table 3 Objective evaluation index results of each algorithm of Fig.7

评价参数	He	Cho	Zhu	Ehsan	本文算法
PSNR	62.761 9	62.804 6	61.795 3	50.294 1	63.387 2
SSIM	0.995 1	0.995 3	0.993 9	0.919 6	0.996 5
信息熵	7.209 7	7.466 2	7.247 1	6.924 8	7.739 1
平均梯度	4.705 5	9.609 9	6.111 8	5.008 6	12.472 6

4 结束语

本文基于暗通道先验算法,提出了基于灰度特

征值分割的暗通道先验去雾增强算法。首先,通过分割天空区域,在天空区域里更为准确地估算大气光值;其次,对透射率模型做出改进,改善了传统暗

通道先验算法去雾后出现光晕现象和细节丢失的问题,同时使用引导滤波细化透射率,并且利用调整容差值优化了去雾图像的质量。针对去雾图像偏暗这个问题,本算法提出用 BFMSR 算法对去雾图像进行平滑处理,接着用 *sigmoid* 函数对去雾图像进行增强,分别从主观视觉效果和客观评价参数两方面证实了本文算法的优越性和可行性。

参考文献

- [1] HE K, SUN J, TANG X. Single image haze removal using dark channel prior [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2010, 33(12): 2341-2353.
- [2] HE K, SUN J, TANG X. Guided image filtering [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2012, 35(6): 1397-1409.
- [3] 蒋建国,侯天峰,齐美彬. 改进的基于暗原色先验的图像去雾算法[J]. 电路与系统学报,2011,16(2):7-12.
- [4] 朱雪俊. 基于视觉感知的低对比度图像细节增强方法[J]. 现代电子技术,2024,47(1):74-77.
- [5] 周辉奎,顾牡丹. 自适应加权直方图均衡化的红外图像增强[J]. 光学技术,2023,49(6):750-755.
- [6] 张宝菊,孙友辰,王琼,等. 基于 HSV 空间的 Retinex 低照度图像增强算法[J]. 天津师范大学学报(自然科学版),2023,43(6):69-74.
- [7] LAND E. Lightness and retinex theory[J]. Journal of the Optical Society of America, 1971, 61(1):1-11.
- [8] JOBSON D J, RAHMAN Z, WOODSELL G A. Properties and performance of a center/surround retinex [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1997, 6(3): 451-462.
- [9] RAHMAN Z, JOBSON D J, WOODSELL G A. Multi-scale retinex for color image enhancement [C]//Proceedings of 3rd IEEE International Conference on Image Processing. IEEE, 1996: 1003-1006.
- [10] 苏欣宇,王涛,诸葛杰,等. 图像去雾中深度学习数据增强方法[J]. 电光与控制,2024,31(3):81-85.
- [11] XIAO J, SHEN M, LEI J, et al. Single image dehazing based on learning of haze layers [J]. Neurocomputing, 2020, 389: 108-122.
- [12] CHEN D, HE M, FAN Q, et al. Gated context aggregation network for image dehazing and deraining [C]//Proceedings of 2019 IEEE Winter Conference on Applications of Computer Vision (WACV). IEEE, 2019: 1375-1383.
- [13] 张鹏. 基于改进小波去噪的图像边缘检测算法[J]. 九江学院学报(自然科学版),2020,35(4):71-74.
- [14] 王敏,邓启志. 基于色彩信息的无参考虚拟视点图像拼接方法[J]. 太原学院学报(自然科学版),2023,41(3):41-47.
- [15] 丁元,邬开俊. 基于 RGB 色彩平衡方法的沙尘降质图像增强[J]. 光学精密工程,2023,31(7):1053-1064.
- [16] CHO Y, JEONG J, KIM A. Model assisted multi-band fusion for single image enhancement and applications to robot vision [J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2018, 3(4): 2822-2829.
- [17] ZHU M Z, HE B W, LIU J T, et al. Dark channel: The devil is in the details [J]. IEEE Signal Processing Letters, 2019, 26(7): 981-985.
- [18] EHSAN S M, IMRAN M, ULLAH A, et al. A single image dehazing technique using the dual transmission maps strategy and gradient-domain guided image filtering [J]. IEEE Access, 2021, 9: 89055-89063.
- [19] 司振惠,于萍,王岩. 基于暗通道的单图像融合去雾算法[J]. 计算机应用与软件,2022,39(8):240-245,284.
- [20] 仲会娟,廖一鹏. 基于改进暗通道和自适应容差的图像去雾算法[J]. 液晶与显示,2022,37(11):1488-1497.