



计算机工程与应用  
Computer Engineering and Applications  
ISSN 1002-8331,CN 11-2127/TP

## 《计算机工程与应用》网络首发论文

题目: 自适应校正透射率的暗通道先验去雾算法  
作者: 王硕, 陈金玉  
网络首发日期: 2020-08-05  
引用格式: 王硕, 陈金玉. 自适应校正透射率的暗通道先验去雾算法. 计算机工程与应用. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2127.TP.20200804.1845.004.html>



**网络首发:** 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

**出版确认:** 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

# 自适应校正透射率的暗通道先验去雾算法

王 硕, 陈金玉

重庆大学 自动化学院, 重庆 400044

**摘 要:** 针对暗通道先验算法复原后的图像在天空区域容易产生色彩失真和伪影的问题, 提出了一种新的暗通道置信度计算方法, 用以校正天空区域的透射率。根据观察, 图像中亮度越高、饱和度越低的区域, 越不满足暗通道先验的假设, 利用二维高斯函数, 结合有雾图像饱和度和亮度的特点, 设计了一种新的自适应调参的暗通道置信度计算方法, 对不满足暗通道先验区域估算的透射率进行补偿。实验结果表明, 本文算法能有效解决暗通道先验在天空区域失效的问题, 复原图像颜色自然, 没有出现色彩失真和伪影。

**关键词:** 图像去雾; 暗通道先验; 透射率; 大气光值

文献标志码: A 中图分类号: TP391.4 doi: 10.3778/j.issn.1002-8331.2004-0191

王硕, 陈金玉. 自适应校正透射率的暗通道先验去雾算法. 计算机工程与应用

WANG Shuo, CHEN Jinyu. Dark channel prior defogging algorithm for adaptive correction transmittance. Computer Engineering and Applications

## Dark channel prior defogging algorithm for adaptive correction transmittance

WANG Shuo, CHEN Jinyu

College of Automation, Chongqing University, Chongqing 400044, China

**Abstract :** Aiming at the problem that the foggy image restored by the dark channel prior algorithm produces color distortion and artifacts in the sky area, this paper proposed a new method that calculates dark channel confidence to correct the transmittance of the scene. The scene with higher saturation and lower brightness will more meet the hypothesis of dark channel prior. Combining the characteristics of saturation and brightness of foggy images, a dark channel confidence calculation method based on Gaussian function and adaptive parameter is designed to correct the transmittance of the scene. Experimental results show that the algorithm of this paper can effectively solve the problem of dark channel prior failure in the sky area, restore the image with natural colors, and there is no color distortion and artifacts.

**Key words :** image dehazing; dark channel prior; transmittance; atmospheric light value

## 1 引言

在雾或雾霾天气条件下, 从户外获得的图像变得模糊, 图像中场景信息的丢失会降低计算机视觉

系统处理的效果, 通过去雾处理来提高图像的视觉效果以及突出图像的特征信息变得越来越重要。

**基金项目:** 重庆市人工智能技术创新重大主题专项重点研发项目(No.cstc2017rgzn-zdyfX0021)。

**作者简介:** 王硕(1993-), 男, 硕士研究生, 研究领域为图像处理; 陈金玉(1969-), 男, 副教授, 研究领域: 控制理论与控制工程, E-mail: cqchenjy@cqu.edu.cn。

目前图像去雾算法主要分为两大类：一类是基于图像增强的去雾算法，对常用的图像增强算法进行针对性的运用和改良，增强图像的对比度，突出图像中景物的特征和有价值的信息<sup>[1,2]</sup>，如基于Retinex的方法<sup>[3]</sup>、基于直方图均衡化的方法<sup>[1,2]</sup>等。另一类是基于物理模型的图像复原去雾算法，从降质图像的形成机理出发，建立大气散射模型，通过一定的先验信息反向推出复原图像<sup>[1,2]</sup>，这类算法针对性强，复原效果自然。近年来，在基于物理模型的去雾方法中，出现了不少基于机器学习和深度学习的去雾算法<sup>[4,5]</sup>，但是该类算法需要大量的有雾图像数据进行训练，而且去雾效果依赖训练图像数据的质量，存在较大的不确定性。

基于物理模型的去雾算法依赖一定的先验知识，如Fattal<sup>[6]</sup>等人假设透射率和物体表面着色局部不相关，以此来估算场景反照率以及介质透射率，但对于浓雾区域，该算法失效；Tan<sup>[7]</sup>等人以最大化局部对比度为约束条件复原图像，复原后的图像易出现颜色过饱和现象和光晕；Kim<sup>[8]</sup>等人通过建立一个包括衡量对比度和信息损失的代价函数，来估算最佳的场景透射率，对天空区域免疫，但是复原结果中易出现亮度不均；Berman<sup>[9]</sup>等人以颜色线为先验条件，利用这些颜色线估算全局的透射率，复原结果中易出现局部过饱和等现象。He<sup>[10]</sup>等人提出暗通道先验的假设，通过求取图像的暗通道，进而估算场景透射率，对户外图像取得了良好的去雾效果。但是当图像中存在天空等明亮区域时，暗通道先验的假设不再成立，导致复原图像容易产生色彩失真或伪影的现象。针对暗通道先验算法在天空区域易失效的问题，后续出现了许多改进算法。Li<sup>[11]</sup>等提出了暗通道置信度的概念，用以校正不满足暗通道先验区域的透射率。刘国<sup>[12]</sup>等人在求取暗通道的过程中，引入自适应阈值，以提高估算透射率的准确度。肖进胜<sup>[13]</sup>等利用边缘检测算法分割出天空区域，并对天空区域的透射率进行补偿。王柯俨<sup>[14]</sup>

等提出多阈值天空分割法，并假定天空区域的透射率为一个定值，以此来校正天空区域的透射率。

本文受以上算法启示，提出了一种基于局部亮度和饱和度的暗通道置信度计算方法，用以校正天空区域的透射率，解决暗通道先验算法在天空区域失效的问题。实验结果表明，本文改进的算法消除了暗通道先验算法在天空区域产生色彩失真、过饱和和伪影等问题，复原的图像中天空区域具有良好的视觉效果。

## 2 背景

### 2.1 大气散射模型

在图像去雾研究领域中，通常用大气散射模型<sup>[1,2]</sup>描述有雾图像的形成：

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

$$t(x) = e^{-\beta d(x)} \quad (2)$$

其中， $I$  是有雾图像； $J$  是场景反射光强度（无雾图像）； $A$  是全局大气光照强度； $t$  为透射率； $\beta$  为大气散射系数； $d$  为场景深度。由大气散射模型可知，若想根据有雾图像  $I$  复原出无雾图像  $J$ ，需要先求得  $A$  和  $t$ 。

### 2.2 暗通道先验

He<sup>[10]</sup>通过定义彩色图像的暗通道并对大量彩色图像进行统计观察，发现图像中色彩鲜艳的区域总有一个颜色通道的值近似或等于 0，由此得到暗通道先验的定理。

$$J_{dark}(x) = \min_{y \in \Omega(x)} (\min_{c \in \{r, g, b\}} J_c(y)) \rightarrow 0 \quad (3)$$

其中， $J_c$  表示图像的一个颜色通道， $c \in \{r, g, b\}$ ， $\Omega(x)$  表示以像素  $x$  为中心的一个窗口。

假设大气光值  $A$  已知，对式(1)的两端同时求取暗通道，可求得透射率  $t$ ：

$$t(x) = 1 - \omega * \frac{I_{dark}(x)}{A} \quad (4)$$

其中， $\omega$  为控制去雾程度的调节参数，通常取 0.95。

最后将  $A$  和  $t$  代入到式(1)中，即可恢复出无雾

图像  $J(x)$  :

$$J(x) = \frac{I(x) - A}{t(x)} + A \quad (5)$$

### 2.3 暗通道置信度

由于天空等明亮区域的像素通道值均很大, 不存在像素通道值趋于零的像素点, 从而不满足暗通道先验的假设, 导致暗通道先验算法失效, 并且在此区域应用 He<sup>[10]</sup>的算法求得的透射率要比实际值偏小, 使得复原结果中天空区域像素通道值的差异被严重放大, 致使复原图像色彩失真。针对这个问题, Li<sup>[11]</sup>等人提出基于局部对比度和亮度的暗通道置信度, 用暗通道置信度的概念表示局部区域暗通道先验算法的满足程度, 以此校正透射率。

$$C(x) = \max(C_1(x), C_2(x)) \quad (6)$$

$$t^c(x) = 1 - \frac{C(x) * I_{dark}(x)}{A_c} \quad (7)$$

$C_1(x), C_2(x)$  分别为由统计局部对比度和亮度得到的暗通道置信度,  $C(x)$  为最终计算得到的暗通道置信度,  $t^c(x)$  为补偿后的透射率。

### 3 本文改进的算法

暗通道先验的假设通常在色彩鲜艳的场景下才成立, 如图 1 中的(b)所示, 在无雾图像中的天空区域, 暗通道值不接近于 0, 导致暗通道先验算法在此区域失效。

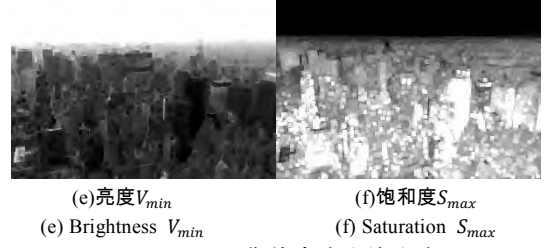
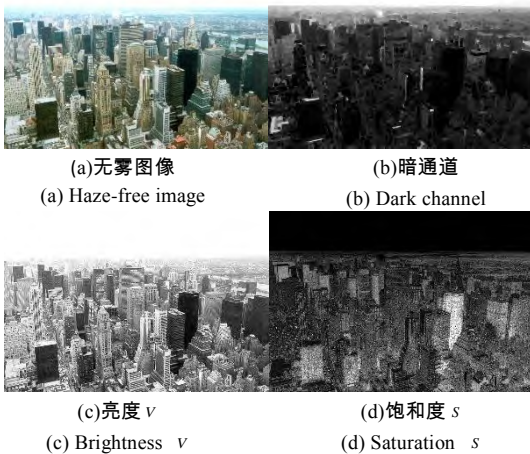


图 1 无雾图像的亮度和饱和度

Fig.1 Brightness and saturation of image

而在有雾图像中, 常常出现如天空、灰白的建筑物等不满足暗通道先验的场景, 本文通过分析这些场景在 HSV 空间的特点, 发现这些灰白高亮的区域有着较高的亮度和较低的饱和度, 如图 1 中的 (c)、(d) 所示。本文基于此特点, 提出了一种新的暗通道置信度计算方法, 用于校正透射率, 并结合四叉树搜索法改进了大气光值的估计方法。

#### 3.1 基于暗通道置信度的透射率估计

实际上, 当图像中灰白高亮区域的面积小于暗通道先验算法使用的最小值滤波的窗口的大小时, 滤波窗口滑动过的区域总能找到暗原色点, 所以暗通道先验在此区域依旧成立, 如图 1(b) 中的建筑物区域所示, 此时透射率是不需要校正的。而当灰白高亮区域的面积大于滤波窗口的大小时, 会出现滤波窗口滑动过的区域不包含任何暗原色点的情况, 导致暗通道先验在此区域失效, 如图 1(b) 的天空区域所示。本文通过对 S 和 V 分别进行最大值滤波和最小值滤波, 以过滤掉那些小面积的灰白区域。

$$S_{\max}(x) = \min_{y \in \Omega(x)} (S(y)) \quad (8)$$

$$V_{\min}(x) = \max_{y \in \Omega(x)} (V(y)) \quad (9)$$

其中,  $s$  和  $v$  分别为 HSV 空间的饱和度和亮度, 且均作归一化处理;  $S_{\max}(x)$  和  $V_{\min}(x)$  为饱和度和亮度分别经过最大值、最小值滤波后的结果, 滤波半径取求暗通道所用的窗口大小。如图(1)d、e 所示, 高亮度和低饱和度的区域基本保持在天空区域。

本文利用二维高斯函数, 结合饱和度、亮度和局部暗通道置信程度的关系, 构造计算暗通道置信



度的公式，如下所示：

$$C(x) = 1 - \exp\left(-\frac{(V_{\min}(x) - 1)^2}{c} - \frac{S_{\max}(x)^2}{c}\right) \quad (10)$$

$$c = \max\left[0.05, \min\left[0.01, \left[1 - \frac{\bar{A}}{255}\right] * 0.2\right]\right] \quad (11)$$

其中， $C(x)$  为暗通道置信度，取值区间为 $[0, 1]$ ， $c$  为关于  $A$  的自适应调节参数， $\bar{A}$  为大气光值均值。实验发现， $c$  的取值区间为 $[0.01, 0.05]$ ，且当大气光值  $A$  越大时， $c$  取较小值有更好的效果，反之取较大值。

当暗通道置信度过低时，会对透射率过度补偿，影响去雾效果，因此需要对  $C(x)$  设定阈值，经实验

分析， $C(x)$  取值区间为 $[0.5, 1]$ ，可获得最佳效果。

$$C^*(x) = \max(0.5, C(x)) \quad (12)$$

图(2)所示为本文算法求得的暗通道置信度，可以看出本文算法能够有效地将有雾图像中天空区域分割出来。

本文通过暗通道置信度来校正透射率，不再保留去雾调节参数  $\omega$ ，求得的粗略透射率为：

$$t(x) = 1 - \frac{C^*(x) * I_{\text{dark}}(x)}{A} \quad (13)$$

本文采用引导滤波<sup>[15]</sup>对粗略透射率进行细化后，得到最终细化的透射率。



图 2 暗通道置信度

Fig.2 Dark channel confidence

### 3.2 基于 HSV 空间的大气光值估计

大气光值应当取无穷远处，即雾最浓的区域，一般为天空区域。本文基于有雾图像在 HSV 空间的特点，采用四叉树搜索法来寻找大气光值存在的区域，算法过程如下：

a. 将原图转换到 HSV 空间中，求得亮度  $v$  和饱和度  $s$ ，对  $v$  和  $s$  作归一化处理；

b. 将图像分成 4 个大小相同的矩形，对每一块求  $\text{Score}[i] = \bar{V}_i - \text{std}(V_i) - \bar{S}_i$ ，其中  $\bar{V}_i$ 、 $\text{std}(V_i)$ 、 $\bar{S}_i$  分别为第  $i$  块区域的亮度平均值、亮度均方差和饱和

度均值；

c. 选取  $\text{Score}[i]$  值最大的区域进行迭代处理，直到到达设置的阈值，阈值为  $\delta = \max(20, \min(h, l) / 20)$ ，其中  $h$  和  $l$  为原图的长和宽；

d. 在最终选取的区域取  $v - s$  最大值的像素点作为大气光值所在点，再将大气光值从 HSV 空间转换到 RGB 空间即可求得  $A$ 。

如图 3 所示，在多种场景下，本文算法都准确的定位到了有雾图像中的天空区域，得到了准确的大气光值。

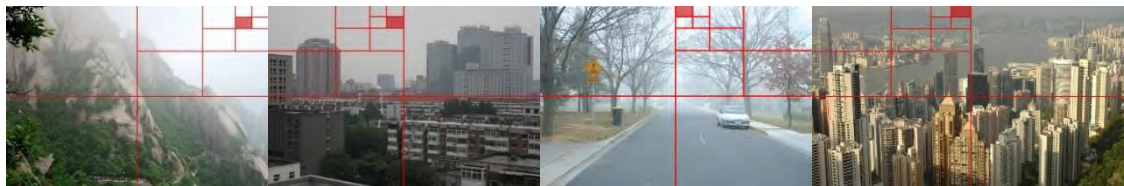


图 3 大气光值估计结果

Fig.3 Experimental results of estimating atmospheric light value

## 4 实验结果与分析

本文实验开发环境使用的是Matlab2016a, 程序运行环境为window10。本文算法计算暗通道和暗通道置信度采用的滤波半径均为自适应取值, 大小为  $\text{krnlSize} = \text{floor}(\max([3, w \cdot \text{kenlRatio}, h \cdot \text{kenlRatio}]))$ ,  $\text{kenlRatio}=0.1$ ,  $w$ 和 $h$ 分别为图像的宽和高。

### 4.1 实验结果

为了验证文本算法去雾的效果, 本文分别选取 He<sup>[10]</sup>的暗通道先验算法, Berman<sup>[9]</sup>的基于颜色线的去雾算法, Cai<sup>[4]</sup>的基于DehazeNet的去雾算法和王<sup>[14]</sup>的基于暗通道先验的改进算法, 与本文算法进行图像去雾比较。





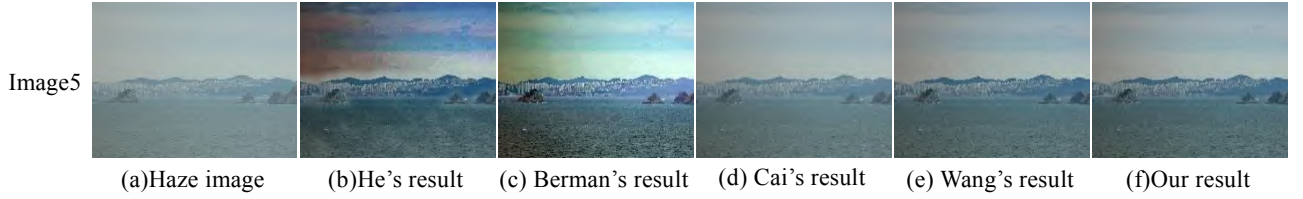


图4 去雾结果比较

Fig.4 Comparison of dehazing results

图4(a)为有雾原图,图4(b)为He的暗通道先验算法的复原结果,可以看出在非天空区域,He的算法有着良好的去雾效果,但是在天空区域,去雾效果并不理想,如图4(b)中,Image1的天空有明显的色彩失真,Image3的天空被过度增强,Image4中的天空存在伪影,Image5中的天空和海面由于过度增强,产生了明显的色差和伪影;图4(c)为Berman的算法,如图4(c)中的Image1所示,该算法在近景和远景都有着良好的去雾效果,但是图像整体或局部会偏暗,如图4(c)中Image2、Image3、Image4所示,局部区域过暗,而且在Image4和Image5中的天空区域产生了明显的亮度不均;图4(d)为Cai的算法,复原结果中不存在色差和伪影,近景复原效果良好,但是复原图像中远景区域去雾程度低,如图4(d)中Image1、Image3、Image4和Image5的远景区域依然有大量明显的雾;图4(e)为王的算法,通过多阈值分割出天空区域,并单独进行透射率的补偿,明显改善了天空区域复原的效果,但是王的算法认为天空区域的透射率为相同的定值,当天空区域的信息比较多时,可能会降低天空区域的去雾效果,如图4(e)中Image2所示,因为天空区域取了较大的透射率,导致天空区域去雾程度降低;图4(f)为本文算法的复原结果,与原算法相比,在天空区域去雾效果良好,如图4(f)中Image1、Image3、Image4和Image5所示,并没有产生严重的色彩失真或伪影等现象,并且在满足暗通道先验的区域,尽可能的保留了原有的去雾效果,但是本文算法并没有解决暗通道先验算法不能有效去除景深突变区域残留雾的问题,如图4(f)中Image1所示,左上角依然有少

量残留的雾。

## 4.2 量化评估

因为本文算法主要解决是暗通道先验算法在天空区域容易失效,导致算法复原结果中出现色彩失真或伪影的问题,所以本文采用文献<sup>[16]</sup>中方法评估复原图像色彩偏移程度,并采用Structural similarity index(SSIM)即结构相似性指标<sup>[17]</sup>,评估有雾图像和复原图像的结构相似程度。

文献<sup>[16]</sup>以原图像和复原图像RGB颜色分量的直方相似性来度量去雾图像的色调偏移程度:

$$d_{correl}(h', h) = \frac{\sum_k (h'_k - \bar{h}')(h_k - \bar{h})}{\sqrt{\sum_k (h'_k - \bar{h}')^2 \sum_k (h_k - \bar{h})^2}} \quad (14)$$

其中,  $\bar{h}'$ 、 $\bar{h}$  分别为  $h'_k$ 、 $h_k$  的均值,计算结果归一化,  $d_{correl}$  越大,匹配度越高,即复原结果的色彩偏移程度越低。

$$SSIM(I, J) = \frac{(2u_I u_J + K_1)(2\sigma_{IJ} + K_2)}{(u_I^2 + u_J^2 + K_1)(\sigma_I^2 + \sigma_J^2 + K_2)} \quad (15)$$

其中,  $I$  表示原始有雾图像,  $J$  为复原图像。 $u_I$  和  $u_J$  分别表示  $I$  和  $J$  的均值,  $\sigma_I^2$  和  $\sigma_J^2$  分别表示图像  $I$  和  $J$  的方差,  $\sigma_{IJ}$  为  $I$  和  $J$  的协方差,  $K_1$  和  $K_2$  为常数,通常取  $K_1 = (C_1 \times L)^2$ 、 $K_2 = (C_2 \times L)^2$ , 一般  $C_1 = 0.01$ 、 $C_2 = 0.03$ ,  $L$  是像素值的范围,取255。 $SSIM$  指标越大,表示原图像和复原结果的结构越相似。

表1、2分别为图4中不同算法的去雾结果的直方图的形状相似性和结构相似性。由表1、2可知,由于Berman的复原结果中经常出现局部过暗或亮度不均的现象,导致其复原结果与原图像的直

方相似性较低。而 Cai 的 SSIM 指标普遍偏高, 是因为 Cai 的算法去雾程度比其他几种算法低, 导致 Cai 的复原结果与原图像有更高的结构相似性。本文算法的复原结果中, 不存在色彩失真等现象, 且在非天空区域尽可能保持了原算法的去雾效果, 所以相比 He 的算法, 本文算法有着更高的直方图相似性和结构相似性。

表 1 各算法处理前后的直方相似性

Table 1 The HSIM values before and after processing

去雾算法	Image1	Image2	Image3	Image4	Image5
He 的算法	0.547	0.625	0.954	0.652	0.519
Berman 的算法	0.532	0.654	0.209	0.599	0.479
Cai 的算法	0.71	0.598	0.115	0.697	0.625
Wang 的算法	0.543	0.585	0.913	0.674	0.527
本文算法	0.566	0.651	0.961	0.698	0.622

表 2 各算法处理前后的结构相似性

Table 2 The SSIM values before and after processing

去雾算法	Image1	Image2	Image3	Image4	Image4
He 的算法	0.688	0.839	0.810	0.813	0.766
Berman 的算法	0.626	0.719	0.659	0.599	0.772
Cai 的算法	0.796	0.938	0.924	0.865	0.979
Wang 的算法	0.734	0.793	0.847	0.771	0.893
本文算法	0.752	0.884	0.834	0.847	0.941

### 4.3 去雾算法的时间消耗

在相同条件的实验环境下, 对图 4 中的 Image1 进行去雾, 文中不同算法的时间消耗如表 3 所示:

表 3 各算法去雾处理时间消耗

Table 3 The time consumption of different algorithms

去雾算法	He	Berman	Cai	Wang	本文算法
耗时/s	1.4786	12.2836	4.1142	1.7253	1.5345

可以看出, 本文算法的去雾处理速度要比 He 的算法稍慢, 是因为去雾过程中需要额外计算暗通道置信度。但是本文算法中计算暗通道置信度所需要的最小值滤波和最大值滤波均能在线性时间内实现, 细化透射率所用的引导滤波也能在线性时间内实现, 所以本文算法的时间复杂度依然是线性的, 算法的复杂度并没有增加。

## 5 结束语

本文基于暗通道先验的算法, 提出了一种新的

基于局部亮度和饱和度的暗通道置信度计算方法, 用暗通道置信度对天空区域的透射率进行校正, 有效地解决了天空区域色彩失真问题, 拓展了算法的适用范围。同时, 利用二叉树搜索法, 结合图像在 HSV 空间的特点来寻找大气光值, 提高了大气光值估计的准确性。实验结果表明, 本文算法能有效地解决暗通道先验算法在天空区域容易产生色彩失真或伪影的问题。

## 参考文献:

- [1] 吴迪, 朱青松. 图像去雾的最新研究进展[J]. 自动化学报. 2015, 41(2): 221-239.  
Wu Di, Zhu Qing-Song. The latest research progress of image dehazing. Acta Automatica Sinica, 2015, 41(2): 221-239.
- [2] Singh D, Kumar V. Comprehensive survey on haze removal techniques[J]. Multimedia Tools and Applications. 2018, 77(8): 9595-9620.
- [3] 马荣贵, 王卫星, 刘威, 等. 结合分数阶微分和暗原色先验及 Retinex 的去雾算法[J]. 华南理工大学学报(自然科学版). 2016, 44(9): 16-23.  
MaRong-gui, Wang Wei-xing, Liu Wei, et al. A Haze Removal Algorithm Combining Fractional Differential, Dark Channel Prior and Retinex[J]. Journal of South China University of Technology(Natural Science Edition). 2016, 44(9): 16-23.
- [4] Cai B, Xu X, Jia K, et al. DehazeNet: An End-to-End System for Single Image Haze Removal[J]. IEEE Transactions on Image Processing. 2016, 25(11): 5187-5198.
- [5] Song Y, Li J, Wang X, et al. Single Image Dehazing Using Ranking Convolutional Neural Network[J]. IEEE Transactions on Multimedia 2018, 20; 20(6): 1548-1560.
- [6] R F. Single image dehazing[J]. ACM Transactions on Graphics. 2008, 27(3): 71-72.
- [7] Tan R T. Visibility in bad weather from a single image[C]. Computer Vision and Pattern Recognition, 2008, 1-8.
- [8] Kim J, Jang W, Sim J, 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.
- [9] Berman D, Treibitz T, Avidan S. Non-local Image Dehazing[C]. Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition, 2016, 1674-1682.
- [10] He K, Sun J, Tang X. Single Image Haze Removal Using Dark Channel Prior[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 2011, 33; 33(12): 2341-2353.
- [11] Li B, Wang S, Zheng J, et al. Single image haze removal using content-adaptive dark channel and post enhancement[J]. IET Computer Vision. 2014, 8(2): 131-140.
- [12] 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): 179-186.



- LiuGuo,LvQun-bo,Liu Yang-yang. SingleImage Dehazing Algorithm Based on Adaptive Dark Channel Prior[J]. ActaPhotonicaSinica. 2018, 47(2): 179-186.
- [13] 肖进胜,高威,邹白昱,等. 基于天空约束暗通道先验的图像去雾[J]. 电子学报. 2017, 45(2): 346-352.
- XiaoJin-sheng,Gao Wei,Zou Bai-yu,et al. Image Dehazing Based on Sky-Constrained Dark ChannelPrior[J]. Acta Electronica Sinica. 2017, 45(2): 346-352.
- [14] 王柯俨,胡妍,王怀,李云松.结合天空分割和超像素级暗通道的图像去雾算法[J]. 吉林大学学报(工学版), 2019, 49(4): 1377-1384.
- WangKe-yan, Hu Yan, WangHuai, LI Yun-song. Image dehazing algorithm by sky segmentation and superpixel-level dark channel[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2019, 49(4): 1377-1384.
- [15] He K, Sun J, Tang X. Guided Image Filtering[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 2013, 35; 35(6; 6): 1397-1409.
- [16] 李大鹏,禹晶,肖创柏. 图像去雾的无参考客观质量评测方法[J]. 中国图象图形学报. 2011, 16(9): 1753-1757.
- Li Da-peng,Yu Jing,Xiao Chuang-bai. No-reference quality assessment method for defogged images[J].Journal of Image and Graphics. 2011, 16(9): 1753-1757.
- [17] Sampat M P, Wang Z, Gupta S, et al. Complex Wavelet Structural Similarity: A New Image Similarity Index[J]. IEEE Transactions on Image Processing. 2009, 18; 18(11; 11): 2385-2401.