

# 基于引导滤波和变差函数的图像去雾算法

章星晨,孙刘杰

(上海理工大学,上海 200093)

**摘要:**针对基于暗原色先验处理后,由于图像偏暗以及天空区域出现颜色偏移、失真等现象,从而造成去雾不彻底的问题,在暗原色先验理论的基础上,提出了一种基于引导滤波和变差函数的图像去雾算法。首先,使用两次引导滤波对暗原色先验模型的透射率进行优化,然后利用变差函数来选取合适的阈值,从而选取准确的大气光值,最后将得到的参数代入去雾物理模型中完成去雾处理。实验结果表明,该算法可以对大气光进行准确估计,有效避免了天空区域的影响。通过不同的算法对不同的室外采集的雾天图像的对比效果可知,该算法可以较好地处理带有光的雾天图像,恢复出来的图像具有更好的细节保持性且更加清晰,视觉效果更加。

**关键词:**图像去雾;暗原色先验;透射率;大气光;引导滤波;变差函数

中图分类号:TP391

文献标识码:A

文章编号:1673-629X(2019)06-0023-04

doi:10.3969/j.issn.1673-629X.2019.06.005

## Image Dehazing Algorithm Based on Guided Filtering and Variation Function

ZHANG Xing-chen, SUN Liu-jie

(University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

**Abstract:** In order to solve the problem of incomplete defogging caused by dark image and color deviation and distortion in the sky area after processing based on dark channel prior, based on the theory of dark channel prior, we propose an image dehazing algorithm based on guided filtering and variogram. First, the transmission of the dark channel prior model is optimized by two guided filters, and then the variogram is used to select the appropriate threshold to select the accurate atmospheric light value. Finally, the obtained parameters are substituted into the dehazing physical model for defogging. The experiment shows that the proposed algorithm can accurately estimate the atmospheric light and effectively avoid the influence of the sky region. Through different algorithms to compare the contrast effects of different outdoor foggy images, the proposed algorithm can better deal with foggy images with light. The restored images have better detail retention and clearer visual effects.

**Key words:** image defogging; dark channel prior; transmission map; high light regions; guided filtering; variogram

## 0 引言

近年来,环境污染越来越严重,SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>和颗粒物急剧增加。前两种是气态污染物,但颗粒物是造成雾霾的最重要原因。雾霾会大大降低图像场景的可视性,图像中的远景和细节模糊不清,且会有颜色偏移与失真现象,极大地影响了图像的质量和相关的应用。图像去雾的主要任务是减弱气象因素对图像质量的影响,提高图像的可视性。它是一个具有广泛应用前景的交叉学科,已成为计算机视觉和图像处理领域的热点话题之一。

现如今,人们在图像去雾领域取得了重大的进展,

提出了大量的去雾算法。Tan等<sup>[1]</sup>通过最大化局部对比度的方法实现去雾以增强图像的可视性,然而往往会产生颜色过饱和的结果,并且可能在深度信息变化较大的地方产生光晕伪影现象。这种现象是由于在对比度最大化过程中高估了雾度浓度造成的,这是使用图像增强技术而不是基于物理学的方法的结果。He等<sup>[2]</sup>假设在清晰图像中暗通道值接近于0,但这种假设在场景物体与大气光相似时是不成立的。并且该方法在对传输图优化时采用的是软抠图算法,这种算法复杂度很高,极大地消耗了内存,使处理速度变得缓慢,不能实现图像的实时处理。为了解决此问题,Shi

收稿日期:2018-07-22

修回日期:2018-11-23

网络出版时间:2019-03-06

基金项目:上海市科学技术计划项目(18060502500);上海理工大学科技发展项目(16KJFZ017)

作者简介:章星晨(1994-),男,硕士研究生,研究方向为图像处理;孙刘杰,硕导,教授,研究方向为图像处理、数字水印。

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1450.TP.20190306.0907.040.html>

等<sup>[3]</sup>采用导向滤波方法代替软抠图算法,但是该方法会出现去雾不彻底的问题。此外,Tang 等<sup>[4]</sup>在基于随机森林的回归框架上研究有雾图像和雾相关的多个特征,相比 He 方法有较大提升,但是整体图像偏暗。一些研究人员还针对特定的应用提出了相应算法,如 Huang 等<sup>[5]</sup>提出了改善道路视觉的方法,Yan 等<sup>[6]</sup>将去雾延伸到交通标志识别中等。由于图像去雾最主要的任务是从输入图像中估计传输图和求出全局大气光的值,所以文中提出了一种基于引导滤波和变差函数的图像去雾算法。该算法相比较于其他算法,所恢复出的图像更加清晰自然,视觉效果更好。

## 1 暗通道原理

### 1.1 大气散射模型

在计算机视觉中,描述雾霾图像的模型<sup>[7]</sup>表达式如下:

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

其中,  $x$  为图像中像素的位置坐标;  $I(x)$  和  $J(x)$  分别为雾天降质图像和场景辐射照度(清晰无雾的图像);  $A$  为整体大气光值;  $t(x)$  为介质传输率。假设雾气是均匀的,此时介质传输率  $t(x)$  可表示为:

$$t(x) = e^{-\beta d(x)}, 0 \leq t(x) \leq 1 \quad (2)$$

其中,  $\beta$  为大气散射系数;  $d(x)$  为场景深度。

式 1 中  $J(x)t(x)$  称为直接衰减项,是描述场景辐射照度在介质中的衰减;  $A(1 - t(x))$  表示大气光幕,描述场景成像加入的大气散射光,是它造成了场景的模糊和图像失真<sup>[7]</sup>。

图像去雾的目的是从雾天降质图像  $I(x)$  中恢复出  $J(x)$ , 将式 1 变换得到:

$$J(x) = \frac{I(x) - A}{t(x)} + A \quad (3)$$

因此,若想恢复出清晰无雾的图像  $J(x)$ , 需要获得透射率  $t(x)$  和整体大气光值  $A$  的大小。

### 1.2 暗原色先验理论

He 等<sup>[2]</sup>提出的暗原色先验理论是通过大量户外无雾图像做统计得出的一个先验规律。他们通过统计规律发现了在绝大多数户外无雾图像中,总是存在一些像素的 RGB 通道中某个像素通道的亮度值很低,且接近于 0。暗通道先验可用式 4 表示:

$$J^{\text{dark}}(x) = \min_{y \in \Omega(x)} (\min_{y \in [r, g, b]} (J^c(y))) \quad (4)$$

其中,  $J^{\text{dark}}(x)$  表示暗通道图像,这个值往往非常低,甚至趋近于 0;  $\Omega(x)$  表示以  $x$  为中心的区域;  $J^c$  表示图像 RGB 三通道的一个颜色通道<sup>[8]</sup>。

通过变换后的式 3 可知,要想还原出无雾图像,首先要知道透射率  $t$  和大气光值  $A$ 。首先,假设大气光值  $A$  是已知的,将式 1 两端同时除以  $A$ ,得出:

$$\frac{I(x)}{A^c} = t(x) \frac{J^c(x)}{A^c} + 1 - t(x) \quad (5)$$

然后对两边做两次最小值处理,得到:

$$\min_{y \in \Omega(x)} (\min_c \frac{I^c(x)}{A^c}) = t(x) \min_{y \in \Omega(x)} (\min_c \frac{J^c(x)}{A^c}) + 1 - t(x) \quad (6)$$

根据暗原色先验理论可知,无雾图像的暗原色值很低,且趋近于 0,即

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

所以可以得到粗略的透射率值,表达式为:

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

为了使复原后的图像更加真实自然,可以引入一个参数  $w$  ( $0 < w < 1$ ),这个参数可以控制算法去雾的程度,通常情况雾的浓度越大,  $w$  的值就越大。文献[2]一般将  $w$  取值为 0.95。因此修正后的透射率表达式为:

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

粗略的透射率  $t$  估计值已求出,接下来是求出大气光  $A$  的大小。 $A$  的值由暗原色像素亮度值最大的前 0.1% 的平均光强决定。当  $t$  和  $A$  的值都已经求出来了,就可以用物理模型来得到最后的无雾图像<sup>[9-11]</sup>。因为当透射率  $t$  的值很小时,  $J$  的值就会偏大,从而使图像整体白场过度,所以通常设置一个阈值  $t_0$ ,当  $t < t_0$  时,令  $t = t_0$ ,通常情况下  $t_0$  取 0.1。由上述可知,最终透射率的表达式为:

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

## 2 去雾算法的改进

### 2.1 基于引导滤波的透射率估计

引导滤波是一种较好的边缘平滑滤波器,对图像细节增强、图像边缘平滑和图像融合去噪的实现都有不错的效果。引导滤波的基本原理<sup>[12]</sup>:输入图像可通过一幅引导图像来进行滤波,输出图像能够保留输入图像的整体特征,并且又能够获取引导图像的细节变化。式 9 估计的透射率是不够精确的,He 等为了提高透射率的精确度,采用软抠图的方法进行优化,但是这种方法实现起来所花费的时间较多,且过程复杂,实时处理效果不好。因此文中采取引导滤波对透射率  $t(x)$  进行估计。首先将  $p$  记为输入图像,  $q$  记为输出图像,  $I$  记为引导图像。以  $k$  为中心的窗口  $w_k$  中有如下的线性关系<sup>[13]</sup>:

$$q_i = a_k I_i + b_k, \forall i \in w_k \quad (11)$$

其中,  $i$  和  $k$  是像素索引;  $a_k$  和  $b_k$  是当窗口中心位

于  $k$  时该线性函数的系数,是两个固定值。

对式 11 两边取梯度,可以得到如下关系式:

$$\nabla q = a \nabla I \quad (12)$$

即当输入图像  $I$  有边缘时,输出  $q$  也有类似的边缘,所以引导滤波才会有良好的边缘保持特性。接下来要求出线性系数  $a_k$  和  $b_k$ ,也就是线性回归,即希望输出图像与输入图像之间的差值最小,最小代价函数表达式如下:

$$E(a_k, b_k) = \sum_{i \in W_k} [(a_k I_i + b_k - p_i)^2 + \varepsilon a_k^2] \quad (13)$$

其中,  $\varepsilon$  为规整化因子,主要是防止  $a_k$  取值过大。

要进行透射率估计,首先把透射率图作为输入图像,使之进行自引导滤波处理,此时滤波半径  $r$  取值为 1,规整化因子取值为 0.01,这是对输入图像进行去噪处理,得到滤波后的图像  $q_1$ 。将滤波后的图像作为输入图像,此时取滤波半径  $r$  为 30,规整化因子取值为 0.01,再次进行引导滤波,得到平滑后的图像  $q_2$ 。因为在进行引导滤波的过程中,滤波半径  $r$  越大,透射图的边缘细节会更加优化,但如果  $r$  值过大,又会使得去雾后的图像出现过饱和现象,达不到预期效果。之后利用公式  $I' = (I - q_2)t + q_2$  对透射率图进行增强处理,  $t$  表示倍乘系数,通常倍乘系数取值为 6 时,亮度及信息熵达到最好状态。最后将  $I'$  作为输入图像,再次执行上述步骤,得到最后的增强图像。

对透射率图进行两次引导滤波处理,可以使图像得到进一步增强,但是若继续进行第三次引导滤波处理,则会使图像出现光晕现象。

## 2.2 基于变差函数估计大气光值

大多数单幅图像去雾算法从图像相关像素中获取大气光值。Tan 等<sup>[1]</sup>使用最大亮度值作为原始图像中的大气光照,但在实际应用中,最亮的像素可能驻留在白色物体中。He 等<sup>[2]</sup>使用暗通道先验规则来估计大气光值,按降序排列每个像素的亮度值,并确保顶部 0.1% 像素的亮度值位于暗通道位置。因此,原始雾天图像中这些位置的最大值就是大气光照值  $A$ 。这种方法在实验中很有效,但因为天空区域对大气光照值的选择有相当大的影响,所以受到一定的限制。在 RGB 色彩空间中,因为三通道值大,所以使得整个图像的大气光值变大。在 He 等的工作基础上,提出了基于变差函数估计大气光,可以减少或消除天空区域对大气光值的影响。

把 RGB 颜色空间看做一个正方体,有雾的天空区域主要分布在对角线周围,所以,对于原始雾天图像,有:

$$S = k \sqrt{[(b - m)^2 + (g - m)^2 + (r - m)^2]} / 3 \quad (14)$$

$$m = (b + g + r) / 3 \quad (15)$$

其中,  $S$  为单个像素的方差;  $k$  为一个比例系数;  $m$  为单个像素的平均灰度值。

$S$  在天空区域的值非常小,但在非天空区域的值较大。可以使用颜色波动的概念来衡量  $S$ 。颜色波动越大,  $S$  就越大,颜色就越亮。但随着景深距离的增加,明亮的物体会变暗。

为了拉伸变差函数的对比度,使之效果更加明显,引入了一个比例系数  $\lambda$  代入式 14、式 15,得出:

$$S = \lambda \sqrt{[(b - m)^2 + (g - m)^2 + (r - m)^2]} \quad (16)$$

$$\lambda = k \sqrt{1/3} \quad (17)$$

文中取  $k = 30$ ,所以  $\lambda = 17$ 。

另外,可以利用变差函数概念<sup>[14]</sup>来选取合适的阈值,通过像素是来自天空区域还是其他的白色物体来判断原始暗通道图像中的亮点是否有效。使用  $\Delta$  作为选定的阈值。设置  $\Delta = 36$ ,如果  $S$  的值小于等于 36,就认为最明亮的点来自天空区域或白色物体,并丢弃此数据;如果  $S$  的值大于等于 36,那么该值就是测量大气光照值的有效基础。通过使用该阈值来避免白色或天空区域的影响,可以有效地保证为整个图像选择的大气光照值是合理的。

## 3 实验结果与分析

为了验证文中算法的有效性,将文中算法与算法 AHE、DCP 进行比较。选取了两幅原始雾天图像,采用不同算法进行处理,并采用主客观的方式<sup>[15]</sup>进行评价。结果如图 1 和图 2 所示。

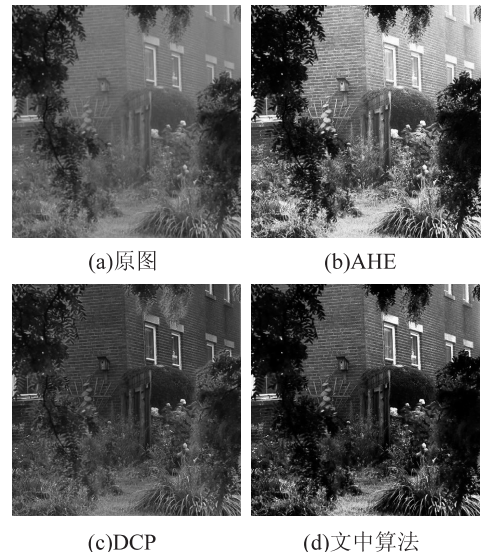


图 1 文中算法与 AHE、DCP 算法的去雾效果对比(1)

由图 2 的处理结果可以看出,文中算法对于天空区域的处理具有较好的效果,这是由于大气光估计的比较准确。而从其他图像可以看出,经过自适应直方



图均衡化处理后的结果图有过饱和、颜色偏移和失真现象,DCP 方法较之 AHE 方法有很大的进步,但整体颜色偏暗,而文中算法就很好地克服了这些缺点,恢复的图像比较清晰自然,色彩保持度也非常好。

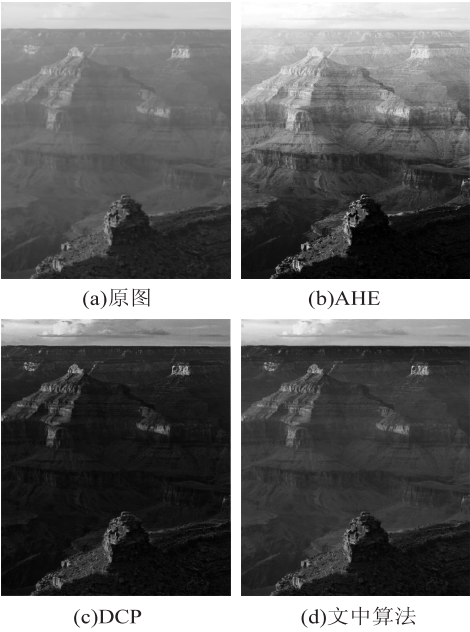


图 2 文中算法与 AHE、DCP 算法的去雾效果对比(2)

为了客观评价上述各算法的去雾效果,文中采取峰值信噪比(PSNR)和信息熵(IE)两种评价指标来进行定量分析。峰值信噪比在图像评价中是最直接、应用时间最长的一种指标,反映了待评价图像的结构完整度以及逼真度。PSNR 值越大,说明抗噪声能力越好。信息熵表示图像包含的信息量,信息熵越大,说明图像包含的信息量越大,图像细节也越丰富。根据表 1 和表 2 的数据分析,可知文中算法与其他两种算法相比有很大的优势,去雾效果更好。

表 1 图 1 中不同算法处理结果比较

指标	Original	AHE	DCP	Proposed
PSNR		22.011 3	21.827 9	24.120 7
IE	7.496 3	7.753 0	7.351 0	7.809 4

表 2 图 2 中不同算法处理结果比较

指标	Original	AHE	DCP	Proposed
PSNR		14.416 1	13.585 7	14.666 7
IE	7.228 2	7.786 6	6.927 5	7.853 4

4 结束语

文中提出了一种基于引导滤波和变差函数的图像去雾算法。首先,使用两次引导滤波对暗原色先验模型的透射率进行优化,然后利用变差函数来选取合适的阈值,从而选取准确的大气光值,最后将得到的参数代入去雾物理模型中完成去雾处理。实验结果表明,

提出的变差函数可以对大气光进行准确估计,有效避免了天空区域的影响。而两次引导滤波的处理也对透射率进行很好的优化。从处理后的图和相应的数据可以看出,该算法恢复出的图像较于其他去雾算法相比更加清晰自然,视觉效果更好。

参考文献:

[1] TAN R T. Visibility in bad weather from a single image [C]//Proceedings of IEEE conference on computer vision and pattern recognition. Anchorage, AK;IEEE,2008:1-8.

[2] HE Kaiming, SUN Jian, TANG Xiaoou. Single image haze removal using dark channel prior [C]//Proceedings of IEEE conference on computer vision and pattern recognition. Miami, FL, USA;IEEE,2009:1956-1963.

[3] SHI Zhenwei, LONG Jiao, TANG Wei, et al. Single image dehazing in inhomogeneous atmosphere [J]. International Journal for Light and Electron Optics,2014,125(15):3868-3875.

[4] TANG Ketan, YANG Jianchao, WANG Jue. Investigating haze-relevant features in a learning framework for image dehazing [C]//Proceedings of IEEE international conference on computer vision and pattern recognition. Columbus, OH, USA;IEEE,2014:2995-3002.

[5] HUANG S C, CHEN B H, CHENG Y J. An efficient visibility enhancement algorithm for road scenes captured by intelligent transportation systems [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems,2014,15(5):2321-2332.

[6] YAN Gang, YU Ming, SHI Shuo, et al. The recognition of traffic speed limit sign inhazy weather [J]. Journal of Intelligent &Fuzzy Systems,2017,33(2):873-883.

[7] 雷 琴,施朝健,陈婷婷. 基于天空区域分割的单幅海面图像去雾方法 [J]. 计算机工程,2015,41(5):237-242.

[8] 李社蕾,李海涛,崔聪颖. 基于暗原色先验模型的水下图像增强算法 [J]. 计算机技术与发展,2018,28(10):70-73.

[9] 代书博,徐 伟,朴永杰,等. 基于暗原色先验的遥感图像去雾方法 [J]. 光学学报,2017,37(3):348-354.

[10] 许 杰,杨会成. 基于暗原色先验与小波变换的图像去雾方法 [J]. 计算机技术与发展,2016,26(2):66-68.

[11] 李 坤,兰时勇,张建伟,等. 改进的基于暗原色先验的图像去雾算法 [J]. 计算机技术与发展,2015,25(2):6-11.

[12] 武 昆,韩广良,杨 航,等. 多尺度引导滤波及其在去雾中的应用 [J]. 光学精密工程,2017,25(8):2182-2194.

[13] 汤群芳,杨 杰,刘海波,等. 基于暗通道先验的单幅图像快速去雾方法 [J]. 光子学报,2017,46(9):205-213.

[14] SULAMI M, GLATZER I, FATTAL R, et al. Automatic recovery of the atmospheric light in hazy images [C]//Proceedings of IEEE international conference on computational photography. Santa Clara, USA;IEEE,2014:1-11.

[15] 李佳童,章毓晋. 图像去雾算法的改进和主客观性能评价 [J]. 光学精密工程,2017,25(3):735-741.