

基于暗原色先验的图像去雾方法研究

郭翰, 徐晓婷, 李博

浙江工业大学理学院应用物理系, 浙江 杭州 310023

摘要 基于暗原色先验理论, 提出一种单幅图像去雾算法, 并对其中的可调参数进行讨论, 分析参数变化对去雾效果的影响。针对原算法中提到不用特殊处理的天空区域进行验证, 发现此区域需要进行单独处理, 通过设置阈值将天空区域隔离出来进行处理, 并取得了较好的效果。对引入的导向滤波算法进行研究, 分析算法中各项参数对算法实时性的影响。为了进一步提高算法实时性, 对图像进行缩小处理, 以减少求取透射率所需的时间, 再利用插值法将透射率图还原至原图尺寸, 从而得到无雾图像。实验证明, 此方法在保证去雾效果的前提下, 可将算法整体运算时间降低 85.7%。

关键词 图像处理; 图像去雾; 暗原色先验; 导向滤波; 插值法

中图分类号 TP751

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.0410002

Study On Image Dehazing Methods Based On Dark Channel Prior

Guo Han, Xu Xiaoting, Li Bo

*Department of Applied Physics, College of Science, Zhejiang University of Technology,
Hangzhou, Zhejiang 310023, China*

Abstract Based on the dark channel prior, we propose a dehazing algorithm for single image, discuss the adjustable parameters of the algorithm, and analyze the impact of parameter variation on the final dehazing results. In the primal algorithm, the sky area is mentioned as no need of special handling. However, we find that this area needs to be treated separately. We set threshold to isolate the sky area separately and receive better effect. Meanwhile, we study on the introduced guided-filter, and analyze the impact of parameters on the real-time performance of the algorithm. In order to improve the real-time performance of the algorithm, we reduce the picture firstly in order to shorten the calculation time, and then enlarge the image by image interpolation method to get haze-free image. The experimental results show that the operation time of the algorithm can be reduced by 85.7% with the premise of image haze removal.

Key words image processing; image dehazing; dark channel prior; guided-filter; image interpolation method

OCIS codes 100.2980; 100.3008; 100.3010; 100.3020

1 引 言

雾天图像增强方法中比较常见的有频率域分析去雾法、直方图均衡去雾法^[1], 以及 Retinex 去雾算法^[2]等。直方图均衡去雾法通过增加像素灰度值的动态范围来实现增强图像对比度的目的, 将雾天图像的直方图通过算法转化为平均分布的形式。Retinex 去雾算法以色彩恒常性为基础, 认为物体的表色由物体表面的反射特性决定, 通过突出图像

中某些信息, 同时削弱或去除某些不需要的信息, 来实现图像去雾。

后来, 学者们对雾天图像从光的极化角度进行了更深入的研究分析。光线可分为垂直极化光和水平极化光两种。为了实现去雾, 先为垂直极化光构造一个合适的滤波器, 再为水平极化光构造另一个合适的滤波器, 利用这两个滤波器来实现去雾, 虽然去雾效果不错, 但该方法由于太过复杂而难以实际应用。之后, 人们利用建模的方式来实现去雾, 首先

收稿日期: 2017-09-26; 收到修改稿日期: 2017-10-31

基金项目: 浙江省自然科学基金(LY14F040003)

作者简介: 郭翰(1993—), 男, 硕士研究生, 主要从事图像处理方面的研究。E-mail: 1033538753@qq.com

导师简介: 李博(1975—), 男, 博士, 副教授, 主要从事图像处理和光电检测方面的研究。

E-mail: libo@zjut.edu.cn(通信联系人)

构建一个关于景物深度与图像梯度的方程,然后求出方程的解。但是,该方法受制于计算量,也很难进行实际应用。

雾气浓度变化是近年来单幅雾天图像研究的重点,研究人员期望通过研究雾天浓度的变化规律来实现去雾。通过对雾天图像和无雾图像的对比发现,无雾图像的对比度比雾天图像高很多。根据这一特征,可以利用对比度之间的区别对图像进行复原,通过提高有雾图像的局部对比度以达到去雾的目的,这也被称为单幅降质图像雾气浓度分析方法^[3]。

光线的反射估算方法需要获取图像的局部颜色,当雾气浓度较大时,图像接近白色,无法估算相应的参数,导致无法实现图像去雾。由于计算量大,以及只对彩色图像有效,因此极大地限制了该方法的适用性。

基于暗原色先验的单幅图像去雾算法是 2009 年 He 等^[4]提出的一种简单可行的图像复原方法,可实现高效去雾。天气晴朗时拍摄的图像中总会有一些颜色通道值较低的点。当雾霾出现时,这些点受到大气光的影响,其值会改变。这种改变可用来估算此时雾的浓度,进而根据雾的浓度来复原无雾图像。但该方法也存在求得的透射率不够精确、计算量非常大、计算过程耗时长、求解过程缓慢的问题。随后,学者们对该算法做了许多改进:黄黎红^[5]给出了一种基于色彩空间转换与分割四叉树的去雾方法,该方法达到了缩减暗原色先验理论去雾霾算法时间复杂度的效果,但仍存在对空气光的估计不够精确、对大雾和浓雾天气处理效果不够理想的问题;Yang 等^[6]在求解透射率分布图时,将暗原色先验同共生直方图均衡相结合,得到的透射率分布图较准确,但对于算法效率并没有太大的改善;蒋建国等^[7]通过引入一种容差机制对算法进行改进,虽然能够很好地处理图像中一些不符合暗原色的区域,但是并不能提高算法的效率;褚宏莉等^[8]提出一种快速去雾霾算法,该算法将图像边缘和非边缘分开,分别用不同大小的模板得到透射率分布图,虽然算法的时间复杂度降低了,但未能较好地处理不符合暗原色理论区域的图像;Tarel 等^[9]采用效率较高的中值滤波优化大气散射光,提升了去雾霾效率,但是因为中值滤波不能很好地保留边缘信息,导致去雾霾后的图像不够真实;王敬东等^[10]提出一种快速航空图像去雾算法,通过增加子块的数目、进行局部加权等,提高边缘保留效果,抑制方块效应,从而获

得较为准确的介质透射率,在一定程度上降低了算法时间的复杂度,去雾效果也较好。

针对单幅图像去雾问题,首先通过设置阈值,将天空区域隔离出来单独处理,以避免出现严重失真;然后,通过对图像进行缩小处理减少求取透射率所需的时间,并提出利用插值法将透射率图还原至原图尺寸的方法来获得无雾图像,以便在保证去雾效果的前提下,大幅度降低算法整体运算时间;最后,利用直方图均衡去雾、Retinex 去雾等 5 种算法对同一幅图像进行处理,列举信息熵、平均梯度和计算时间 3 个参数来进行对比,以验证本文算法的优势。

2 暗原色去雾

2.1 暗原色先验理论

He 等^[11]通过分析大量无雾图像特征,得出一种统计规律,将其称之为暗原色先验,这种统计规律在雾天图像中也适用。基于此,提出一种单幅图像去雾方法。第一步,将有雾图像在 RGB 空间进行分解,最小值的选取在大小一定的局部块中进行,RGB 三通道中的最小分量会被求出。van Herk^[12]的快速算法常被用来对最小分量值进行局部区域最小滤波。此过程的数学表达式描述为

$$J^{\text{dark}}(x) = \min_{y \in \Omega(x)} \left[\min_{c \in \{r, g, b\}} J^c(y) \right], \quad (1)$$

式中 J^{dark} 为图像 J 的暗原色,这个值在理论上总是很低,并且无限趋近于 0, J^c 为 J 的 RGB 三通道中某一个颜色通道, $\Omega(x)$ 是以 x 为中心的局部块区域。由暗原色求取公式可以清晰地了解到,计算一个像素点的暗原色其实就是两次取最小值的过程^[13]。第一次取最小值是比较出像素点 y 在 RGB 三通道中的最小值,第二次是在以像素点 x 为中心的一个局部块区域中比较出最小的那个 y 的亮度。因此, J^{dark} 的值在理论上应该是无限趋近于 0 的。

2.2 暗原色先验图像去雾

通过雾天成像模型可以知道,要求解无雾图像,首先需要知道图像的透射率 t 与环境大气光值 A 。在利用暗原色先验理论求解无雾图像时:1)利用暗原色先验理论求解出雾天图像的暗原色图;2)假设大气光值 A 为一个已知值^[14],通过暗原色图预估出图像透射率 t 的值^[15],大致得到图像透射率的传输图,再利用暗原色估计大气光值,此时 A 和 t 都有了估值,即可根据雾天成像模型求出对应的无雾图像^[4]。在两边同时除以 A ,有:

$$\min_{y \in \Omega(x)} \left[\frac{I^c(y)}{A^c} \right] = \tilde{t}(x) \min_{y \in \Omega(x)} \left[\frac{J^c(y)}{A^c} \right] + [1 - \tilde{t}(x)], \quad (2)$$

式中 I^c 是测量到的光强大小, \tilde{t} 为 t 的估值, 对式中 RGB 三通道进行取最小值操作, 有:

$$\min_{y \in \Omega(x)} \left\{ \min_c \left[\frac{I^c(y)}{A^c} \right] \right\} = \tilde{t}(x) \times \min_{y \in \Omega(x)} \left\{ \min_c \left[\frac{J^c(y)}{A^c} \right] \right\} + [1 - \tilde{t}(x)]. \quad (3)$$

根据前面的暗原色先验理论, 有:

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

$$\min_{y \in \Omega(x)} \left[\min_c \frac{J^c(y)}{A^c} \right] = 0. \quad (5)$$

将暗原色先验得出的(5)式代入(2)式, 由于大气光值 A 始终为正值, 则透射率的初始估计值为

$$\tilde{t}(x) = 1 - \min_{y \in \Omega(x)} \left\{ \min_c \left[\frac{I^c(y)}{A^c} \right] \right\}. \quad (6)$$

即使是在晴天, 空气中也始终存在着一些颗粒, 一般用肉眼观察远处的物体还是会感觉景色比较模糊。另外, 人们可以通过雾来感受看到的景象中景深的存在。为了和实际保持一致, 在(6)式中引入一个 $[0, 1]$ 区间的因子 ω , 该因子可以控制算法去雾的程度, 在 He 等^[4]的研究中取值为 0.95, 那么就有:

$$\tilde{t}(x) = 1 - \omega \min_{y \in \Omega(x)} \left\{ \min_c \left[\frac{I^c(y)}{A^c} \right] \right\}. \quad (7)$$

前面已经求得有雾图像的透射率 t 的预估值, 得到图像透射率的传输图, 下一步就是要求出大气光值 A 。首先, 从暗原色图中取出图中亮度大小居前千分之一的像素点^[4], 然后, 将具有最高亮度的点的值作为 A 的值。

当 A 和 t 都有了估值, 就可以利用成像模型来求取无雾图像了^[16]。由于之前求得的透射率 t 值偏小, 这将导致图像向白场过度的结果, 因此需要对 t 设置一个阈值 t_0 , He 等^[4]的研究中 t_0 取值为 0.1。当求得的 t 小于阈值 t_0 , 则取阈值 t_0 。最终, 无雾图像恢复公式为

$$J(x) = \frac{I(x) - A}{\max[t(x), t_0]} + A. \quad (8)$$

2.3 暗原色去雾参数分析

在暗原色先验去雾过程中, 有很多的可变参数。窗口大小就是一个十分重要的参数。计算过程中选取的窗口越大, 意味着窗口中包含暗原色的概率就会越大, 那么获取对应的暗原色值也就越大。窗口大小的选取是暗原色计算部分的一个关键, 直接影响对有雾图像处理的精细程度。选取的窗口越小, 处理得越精细, 需要计算的量也越大, 时间也越长。

图 1 为选取不同窗口大小后的去雾效果对比

图。计算过程中选取的窗口越大, 最终算法的去雾效果越差。为了保证算法的去雾效果, 选取的窗口不能太大。但窗口过小会导致处理时间过长, 影响算法的实时性, 所以窗口也不能太小。综合考虑去雾效果和处理时间, 建议选取的窗口大小为 15~45, 也可以根据处理图像的图像的尺寸和雾的浓度适当调整窗口大小。

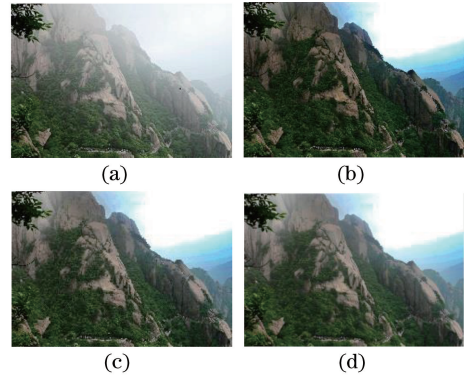


图 1 (a)原图及选取窗口大小分别为 (b) 10, (c) 50, (d) 100 的去雾效果图

Fig. 1 (a) Original image and haze removal results after select different window sizes of (b) 10, (c) 50, and (d) 100

上文中提到的参数 ω 的意义则更加直观地体现在去雾效果上, 这个介于 0~1 的参数可以直接控制最终去雾效果。通过改变参数 ω 的大小可实现保留一定程度的雾^[17]。图 2 所示为 ω 分别取 0.5、0.75、0.95 的效果。

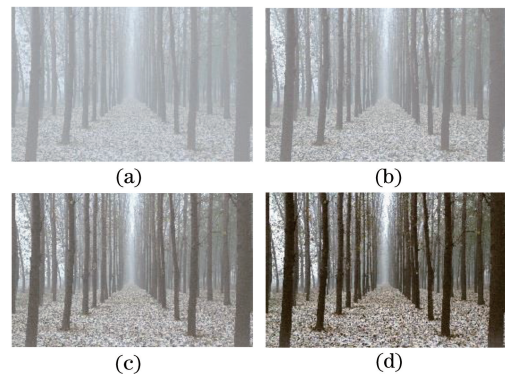


图 2 (a)原图及选取 ω 分别为 (b) 0.5, (c) 0.75, (d) 0.95 的去雾效果

Fig. 2 (a) Original image and haze removal results after select different ω values of (b) 0.5, (c) 0.75, and (d) 0.95

2.4 “halo”产生的原因

使用基于暗原色先验理论的去雾算法对雾天图像的透射率值进行预估时, 在一个局部块内会存在透射率 t 的取值并不总相同的情况, 如果发生在景深边缘两边的场景透射率相差很大的情况下, 会使

t 的估测图中存在一些小方块,即通常所说的“halo”现象^[18],最终直接影响去雾效果。雾天图像暗原色的求取是以图像中每个像素作为计算中心的,以 x 为模板逐点进行暗原色计算,这会导致在暗原色图上暗的部分会一定程度地吞噬其周围场景。这个过程在透射率的估计中表现为亮的部分向外扩张,并且覆盖周围的边缘,体现在最终的去雾效果图上是该部分会变亮。而且由于被吞噬和被扩张,在透射率图中,边缘位置与原图像相比也发生了改变。

对于雾天图像而言:当 Ω_x 区域内为同一物体时,其暗原色能够准确得到,其透射率也可以得到;而当 Ω_x 区域内存在场景边缘,特别是边缘两边物体颜色差异较大或景深差异较大时,位于边缘处附近的暗原色值存在较大差异,此区域内 Ω_x 透射率的值也并不相同,当然,相邻子块之间的透射率也会存在差异^[19]。由于图像边缘位置和图像的亮度发生变化,它们的变化共同导致了图像边缘模糊不清,即视觉上的“halo”现象。

图 3 所示为雾天图像及其暗原色图、透射率图,以及最终的去雾效果图。在暗原色图中某些暗原色值高的区域明显变大,这是由于图中暗原色值较大区域出现向外扩张,周围场景的边缘被它们覆盖掉了,体现在透射率图中则是相对应的明亮区域变大。在图像场景中类似石块等其他区域由于被吞噬,这些场景在暗原色图和透射率图中的值都会变小^[19]。

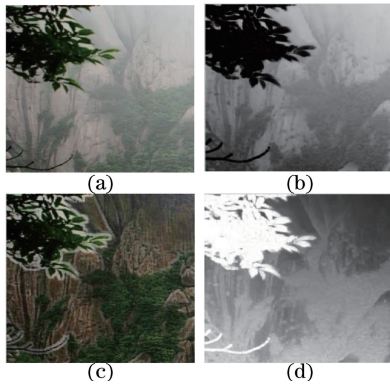


图 3 “halo”现象的发现。

(a) 原图; (b) 暗原色图; (c) 透射率图; (d) 去雾效果图

Fig. 3 Discovery of "halo" phenomenon.

(a) Original image; (b) dark channel of original image;

(c) transmission ratio image; (d) haze removal result

场景如果出现与天空交汇的区域,也会出现比较明显的“halo”现象,此时在天空区域与非天空区域交界处会形成一条亮边,如图 4(b)所示,无论是远山还是树,在与天空交界处都出现了“halo”现象。另外,当图像中的场景深度发生较大突变时,雾的浓

度也同时会发生大的改变,此时发生“halo”现象的几率也较大。如图 4(b)所示,山与天空交界处的景深也发生了突变。对于这类图像,如果直接采用基于暗原色先验理论的去雾方法,最终的去雾图像上就会出现很明显的“halo”现象,图像在边界处会出现比较明显的白色晕块,因此,对雾天图像进行处理必须考虑天空交界处,以及景深出现突变时的情况^[20]。

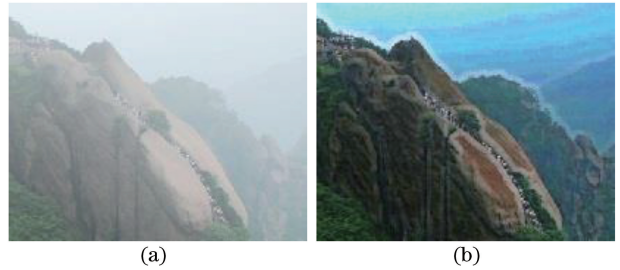


图 4 天空交汇处“halo”现象。(a) 有雾图像; (b) 去雾效果图

Fig. 4 "Halo" phenomenon at sky edge.

(a) Hazy image; (b) haze removal result

虽然“halo”现象在图像去雾过程中会使图像视觉效果受到影响,但并不是对所有图像都有这种影响。轻微的“halo”现象在图像的某些区域是可以接受的,不会对去雾后图像的目标判读和进一步的图像处理产生太大影响。综上,由于暗原色去雾本身存在的缺陷,使得利用其估测透射率时会带来“halo”现象,导致场景边缘处的处理存在缺陷。为此,必须对透射率图进行修复、细化处理,以保证图像中场景边缘处的透射率能更加准确地被估计,在场景边缘处不会出现白色晕块现象。He 等^[4]使用软抠图的办法对已经求得的图像的透射率图作进一步的优化修复。本文利用导向滤波方法对图像透射率进行修复,以使去雾图像在边缘处过渡得更加自然。

3 导向滤波

3.1 导向滤波

导向滤波是一种边缘平滑滤波器,图像细节增强、图像边缘的平滑以及图像融合去噪等都可以通过导向滤波来实现^[21]。输入的图像可以通过一幅引导图像来对其进行滤波,在滤波过程中输入图像整体特征,基本都可以被输出图像很好地保存下来,输出图像同时又可以充分获取引导图像的细节变化,这是导向滤波的基本原理。在以 k 为中心的窗口 ω_k 中有如下线性关系:

$$q_i = a_k I_i + b_k, \forall i \in \omega_k, \quad (9)$$

式中 q_i 为输出图像, I_i 为引导图像, ω_k 是半径为 r 的方形窗口, a_k 与 b_k 为窗口中的线性参数, 它们是两个固定值。可以看到, 局部线性模型保证了窗口 I 中有边缘时, q 也会产生相应的边缘, 且有 $\nabla q = a \nabla I$ 。解出线性因数 (a_k, b_k) 的最优解是进行导向滤波的关键所在, 求出这个最优解能保证输出图像与输入图像的差值最小。其最优解表示为

$$E(a_k, b_k) = \sum_{i \in \omega_k} [(a_k I_i + b_k - p_i)^2 + \epsilon a_k^2], \quad (10)$$

式中参数 ϵ 是为防止 a_k 取值过大。通过(10)式可以得到 (a_k, b_k) 的最优解:

$$a_k = \frac{\frac{1}{|\omega|} \sum_{i \in \omega_k} I_i p_i - \mu_k \bar{p}_k}{\sigma_k^2 + \epsilon}, \quad (11)$$

$$b_k = \bar{p}_k - a_k \mu_k, \quad (12)$$

式中 σ_k^2 和 μ_k 分别为窗口 ω_k 中 I 的方差与均值, $|\omega|$ 则是用来表示窗口 ω_k 中的像素个数, \bar{p}_k 为窗口中 p 的均值。不同的窗口中可能同时包含点 i , 不同的窗口中 a_k, b_k 的值也不一样, 计算包含点 i 的窗口内 a_k, b_k 的平均值 \bar{a}_i, \bar{b}_i 是很有必要的, 然后对应求出 q_i 的值:

$$q_i = \frac{1}{|\omega|} \sum_{k \in \omega_k} (a_k I_i + b_k) = \bar{a}_i I_i + \bar{b}_i. \quad (13)$$

3.2 导向滤波参数分析

在进行导向滤波的过程中, 滤波半径 r 越大, 引导图像进行平均线性输出的范围相应地就会越大, 透射率图边缘细节会得到更好的优化, 边缘的过渡会更平滑, “halo”现象可以有效避免。特别是在边缘的透射变化更强的部分, 这种现象更明显^[22]。对 1 幅 $512 \text{ pixel} \times 370 \text{ pixel}$ 的图像使用导向滤波进行去雾处理, 导向滤波参数 r 分别取 1、37、100, 图像经过导向滤波后的透射率图如图 5 所示, 最终的去雾效果如图 6 所示。

从图 5 可以看出, 当参数 r 的值比较小时, 通过导向滤波得到的透射率图非常模糊, 很多细节无法在透射率图中体现出来, 对应图 6 的去雾效果就是图像边缘处透射率没有得到很好的修复, 有非常明显的“halo”现象。可以看到, 图中使用 $r=1$ 的导向滤波去雾图中, 场景边缘处有非常明显的白色晕块。参数 r 越大, 透射率图中可以得到的细节越多^[22], 对应去雾效果图上边缘处的过渡更平滑, 能够更有效地避免“halo”现象的出现。对比 $r=1$ 与 $r=37$ 的透射率图可以看到, $r=37$ 所得的透射率图更加清晰地体现出了整座山的透射率; 进一步对比 $r=37$ 与

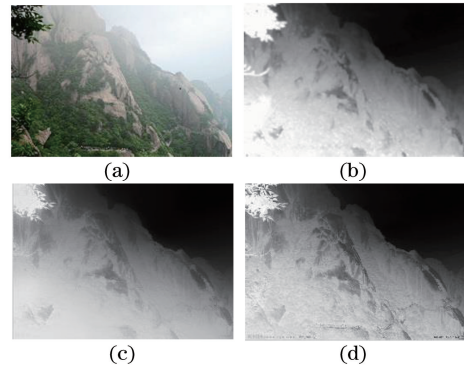


图 5 (a)有雾图像及滤波参数 r 分别为 (b) 1, (c) 37, (d) 100 的透射率图

Fig. 5 (a) Hazy image and transmission ratio images with different filtering parameter r values of (b) 1, (c) 37, and (d) 100

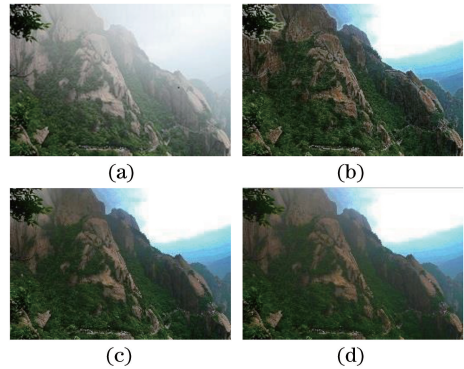


图 6 (a)有雾图像及滤波参数 r 分别为 (b) 1, (c) 37, (d) 100 的去雾效果图

Fig. 6 (a) Hazy image and haze removal results with different filtering parameter r values of (b) 1, (c) 37, and (d) 100

$r=100$ 的透射率图可以看到, $r=100$ 条件下不仅更加清晰地体现出山的透射率, 而且图像下方山路的透射率也比较清晰。但 r 的值也不是越大越好, r 值太大以后, 去雾后的图像出现颜色过饱和与去雾不足的情况, 在图中就表现为树的颜色太绿, 而且整个图像看起来有些模糊, 达不到预期效果。通过对图像去雾效果的对比, 建议 r 取值范围为 $30 \sim 60$ ^[23], 可以根据图像大小进行调整。

为了防止由于 a_k 取值过大而在计算过程中对图像的质量产生影响, 设置调整参数 ϵ , 由(11)式可知, a_k 的值会随着 ϵ 的增大而相应地减小^[24], 而 b_k 取值会随之趋近于 \bar{p}_k 。分别选取 $\epsilon = 10^{-1}, 10^{-3}, 10^{-6}$ 时的透射率图进行比较。如图 7 所示, $\epsilon = 10^{-3}$ 时的透射率图清晰度要远大于 $\epsilon = 10^{-1}$ 时的透射率图, 而 $\epsilon = 10^{-6}$ 时的透射率图相较于 $\epsilon = 10^{-3}$ 时清晰度无明显提高。因此, ϵ 值建议取 0.001 或者更小^[25]。

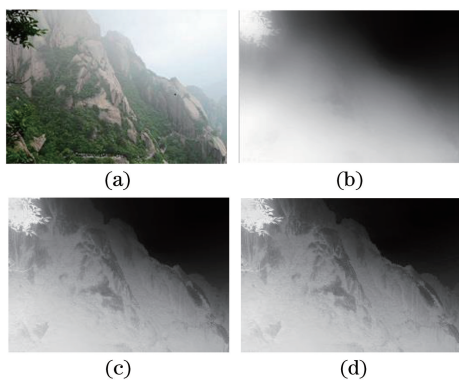


图 7 (a)有雾图像及调整参数 ϵ 分别为 (b) 10^{-1} , (c) 10^{-3} , (d) 10^{-6} 的透射率图

Fig. 7 (a) Hazy image and transmission ratio images with different adjustment parameter ϵ values of (b) 10^{-1} , (c) 10^{-3} , and (d) 10^{-6}

4 天空区域的处理

He 等^[4]在进行计算时会选取暗原色图中最大亮度的前千分之一的像素点,将其中亮度最高的那一点的值作为 A 值。这也就意味着,选取原始图像 I 中的某一点的值来作为整幅图像的环境光值 A ,对于图像中可能存在的天空区域没有进行特殊处理。图 8 为按 He 等^[4]的算法,未对天空区域进行特殊处理的去雾效果图与原图的比较。可以看到,去雾效果图中天空部分的过渡不太自然,并伴有一些光斑出现,即天空区域出现了失真,显然该算法对于这一区域的处理效果并不令人满意。He 等^[4]提出,对于雪地、天空、大海等场景,暗原色先验统计规律可能是无效的。这种失真可能是由大气环境光值选定所致。大片的天空区域的出现,会导致各通道的大气光值接近于 255^[26],最终导致去雾图像的部分天空区域出现大量的颜色不均匀的问题。

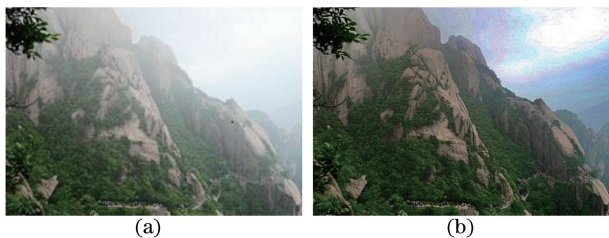


图 8 未经特殊处理的天空部分的

(a)原图与(b)去雾效果图比较

Fig. 8 Comparison of (a) hazy image and (b) haze removal result without special sky treatment

为解决上述问题,只要将天空识别出来,并且将原值保留即可。对大气光值添加一个限制参数,设定这个阈值为 A_0 ,它的取值范围在理论上为

$0 \sim 255$ 。当计算的 A 值大于 A_0 时,则令 $A = A_0$ 。图 9 为 A_0 取不同数值时,针对图 8(a)的有雾图像对大气光值进行一定限制后的最终去雾效果。可见, $A_0 = 230$ 时对天空区域的处理效果最好,小于等于 220 时将会严重影响或破坏非天空区域的图像信息,而大于 240 时将会使处理后的天空区域出现较大失真。

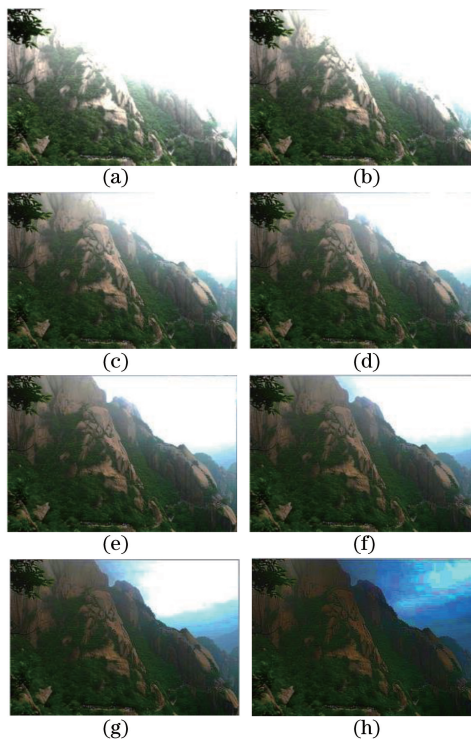


图 9 阈值 A_0 分别为(a) 80, (b) 150, (c) 200, (d) 210, (e) 220, (f) 230, (g) 240, (h) 255 的天空处理去雾效果

Fig. 9 Haze removal results after sky treatment with different threshold A_0 values of (a) 80, (b) 150, (c) 200, (d) 210, (e) 220, ; (f) 230, (g) 240, and (h) 255

5 用图像插值算法提高实时性

5.1 图像插值法

首先,需要选取合适的图像插值算法,以便在保证图像不会出现严重失真的前提下尽可能快地完成图像的缩放工作。常用的图像插值算法包括:计算效率较高的最近邻域插值、计算精度较高的双线性插值、计算量最大的三次卷积插值。

最邻近域插值的思路很简单,对通过反向变换得到的一个浮点坐标进行简单的取整,得到一个整数型坐标^[23],这个整数型坐标对应的像素值就是目的像素的像素值。最邻近域插值的最大好处是效率高、运算量小,缺陷则是插值质量不是很好,存在很多相关性和噪点现象。

双线性插值,又称为双线性内插,是在两个方向分别进行一次线性插值。线性插值就是两个变量的插值函数的线性插值扩展,其核心思想是在点 A、B 中间插入点 C(点 C 坐标在 AB 连线上)^[24],那么 AB 的值的连线上就可以直接插入 C。双线性插值的插值效果优于最近邻域插值,计算量也大于最近邻域插值。

三次卷积法计算一个浮点坐标($i+u, j+v$)周围的 16 个邻点,目的像素值 $f(i+u, j+v)$ 可由插值公式得到。三次卷积法虽然计算量大,但是计算精度高。

先利用一幅 1024 pixel×683 pixel 的图像比较 3 种插值法的效果与效率。对图像进行先缩小再放大的操作,取 $N=10$,结果如图 10 所示。

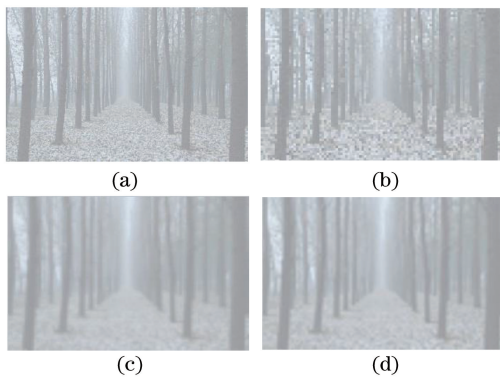


图 10 插值效果图对比。(a)有雾图像;(b)最邻近域插值;(c)双线性插值;(d)三次卷积内插

Fig. 10 Comparison of images with different interpolation methods. (a) Hazy image; (b) nearest neighbour interpolation; (c) bilinear interpolation; (d) cubic convolution interpolation

由图 10 可以看到,三次卷积法插值对图像的还原效果最好,但耗时间最长,共用时 45 ms;最邻近域插值速度最快,只用了 7 ms,但有非常明显的失真,无法满足使用要求;双线性插值恢复图像质量比最邻近域插值要好,且用时(35ms)比三次卷积法

要快。综合处理时间和处理效果,选用双线性插值对图像进行缩放处理,以提高算法的实时性。

利用双线性插值求取图像的透射率,并比较所得透射率和 He 等^[4]算法的区别,如图 11 所示。



图 11 $N=5$ 时插值法使用(a)前、(b)后透射率对比

Fig. 11 Comparison of transmission ratio images (a) without and (b) with interpolation method when $N=5$

5.2 结合插值法后的效果及多种算法对比

从图 11 可以看出,通过双线性插值后的透射率图基本和 He 等^[4]的算法所得的透射率图保持一致,但是整张图看起来似乎更“亮”一些^[25],这表明通过图像插值求得的透射率还是不同于原算法。

通过最终的实验效果图来比较使用插值法求取透射率图后的去雾效果,同时,将本文算法与其他较典型去雾算法处理后的去雾效果图进行比较,如图 12 所示。为了更加直观地检验本文算法对雾天图像的处理效果,选取一幅雾天图像,使用直方图均衡去雾、Retinex 去雾、结合软抠图的暗原色去雾即 He 算法、结合导向滤波的 He 算法、本文算法进行去雾处理。再将去雾后图像的参数进行统计处理,分别选取去雾后图像的信息熵、对比度、平均梯度 3 个参数来评价算法的去雾效果,通过算法对同一幅图像的处理时间来评价算法的实时性。熵是“混乱”程度的量度,也可以在一定程度上反映图像包含的信息量^[27]。平均梯度指图像的边界或影线两侧附近灰度是否有明显差异,即灰度变化率大小,可用来表示图像清晰度。表 1 为不同算法处理一幅 320 pixel×290 pixel 的雾天图像的处理结果。

表 1 算法处理结果对比

Table 1 Comparison of algorithm processing results

Index	Original image	Histogram equalization	Retinex	He	He combined with guided-filter	Proposed algorithm
Comentropy	5.83	7.54	7.1	7.25	7.98	8.03
Contrast	30.03	51.47	60.23	41.41	74.74	66.65
Average gradient	3.15	8.41	8.56	9.36	8.84	10.12
Computing time /s	—	0.381	4.234	2.672	0.926	0.3815

从图 12 和表 1 可以看出,直方图均衡法及 Retinex 法不能完全实现去雾,并且处理后的图像

清晰度和精细度大幅下降,但是直方图去雾法的计算时间是所有算法中最短的。单从去雾效果来说,



图 12 不同算法去雾效果。

(a)原图; (b)直方图均衡; (c) Retinex; (d) He 算法; (e)结合导向滤波的 He 算法; (f)本文算法

Fig. 12 (a) Original images and haze removal results with different algorithms of (b) histogram equalization, (c) Retinex, (d) He algorithm, (e) He algorithm combined with guided-filter, and (f) proposed algorithm

显然本文算法处理后的效果略优于 He 算法,可完全满足要求,但本文算法处理后的效果在某些场合稍逊于结合导向滤波的 He 算法。本文引入插值法的主要目的是在保证不低于 He 算法去雾效果的基础上,改进和提升运算时间,而结合导向滤波的 He 算法,是在原始 He 算法的基础上,对去雾后的图像质量进行改进和提升,两者侧重点不同。本文算法将计算时间从 He 算法的 2.672 s 缩短到了 0.3815 s,降低 85.7%,比结合导向滤波的 He 算法的 0.926 s 也降低了 58.8%,这使得实时去雾成为了可能。这就意味着,引入插值法求取透射率可有效提高算法实时性,在保证算法去雾效果的同时大幅减少运算时间。从图 12 (e)的第 3 幅图可以看出,结合导向滤波的 He 算法也会存在一些不足,在图像右侧的树木部分,即光线较好的部分,会出现过曝的情况,降低了图像的清晰度,但本文算法未出现类似问题。从统计结果也可看出,本文算法处理后的图像熵值最大,即包含的信息量最多。本文算法处理后图像的对比度略小于结合导向滤波的 He 算法处理后的结果,但明显优于其他 3 种算法。本文算法处理的图像平均梯度值是最大的,He 算法次之。在算法计算时间上,除直方图均衡去雾法外,本文算

法相对于其他算法具有明显优势。

综上所述,直方图均衡去雾法虽计算时间最短,包含信息量尚可,但整体的清晰度最差;Retinex 去雾法在各方面的表现都不尽如人意;He 算法的计算时间过长;结合导向滤波的 He 算法,计算时间虽有一定减少,但依旧明显逊于本文算法;本文算法能在保证去雾后图像的清晰度和精细度的基础上,大幅度缩减计算所需的时间,使得对视频的实时去雾成为可能。

虽然利用插值法能够提高算法的实时性,减少算法运行时间,但也会给算法带来一些限制。利用插值法进行运算时,是按照系数 N 对图像进行缩放的。在求取图像透射率时,须先将图像缩小为原来的 $1/N$,然后使用导向滤波求出缩小后图像的透射率图,接着使用插值法将求得的透射率图再放大 N 倍用于求取最终的去雾图像。值得注意的是,插值法在进行缩放时,是针对图像尺寸进行缩放,如一幅 $1020 \text{ pixel} \times 760 \text{ pixel}$ 的图像缩小 $1/5$ 后,图像变为 $204 \text{ pixel} \times 152 \text{ pixel}$ 。这种插值方式存在的问题就是,如果原图尺寸不是 N 的倍数的话,如一幅 $1024 \text{ pixel} \times 739 \text{ pixel}$ 的图像先缩小 $1/5$ 再放大 5 倍后,图像尺寸就变为 $1025 \text{ pixel} \times 740 \text{ pixel}$,求

出的透射率图与原图大小不一致,无法用于最终去雾图像的求取。考虑到现在视频图像尺寸一般为1920 pixel \times 1080 pixel、1080 pixel \times 720 pixel、640 pixel \times 480 pixel,此问题一般不会影响到视频图像的处理。

6 结 论

结合导向滤波技术,改善原有算法在透射率求取上出现的计算量过大、计算时间过长的问題。通过调整算法中参数,给出各个参数的合适范围,以保证最终去雾的效果。在算法的求取透射率阶段引入图像插值算法,通过对图进行缩小处理减少求取透射率所需的时间,再通过插值法将透射率图还原至原图尺寸,以获得无雾图像。实验结果表明,本文算法在保证去雾效果的前提下,大幅度降低了运算时间,使视频实时去雾成为可能。

参 考 文 献

- [1] Liang J, Ju H J, Zhang W F, *et al.* Review of optical polarimetric dehazing technique [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(4): 0400001.
梁健, 巨海娟, 张文飞, 等. 偏振光学成像去雾技术综述[J]. *光学学报*, 2017, 37(4): 0400001.
- [2] Liu H B, Yang J, Wu Z P, *et al.* A fast single image dehazing method based on dark channel prior and Retinex theory [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2015, 41(7): 1264-1273.
刘海波, 杨杰, 吴正平, 等. 基于暗原色先验和Retinex理论的快速单幅图像去雾方法[J]. *自动化学报*, 2015, 41(7): 1264-1273.
- [3] Chu J, Wang H B, Tao L, *et al.* Novel algorithm for single haze image restration based on guided image filtering [J]. *Computer Engineering and Applications*, 2015, 51(21): 155-160.
楚君, 王华彬, 陶亮, 等. 基于引导滤波器的单幅雾天图像复原算法[J]. *计算机工程与应用*, 2015, 51(21): 155-160.
- [4] He K M, Sun J, Tang X O. Single image haze removal using dark channel prior [C]. *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2009: 1956-1963.
- [5] Huang L H. A new single image dehazing algorithm [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, 40(9): 1519-1422.
黄黎红. 单幅图像的去雾新算法[J]. *光子学报*, 2011, 40(9): 1519-1422.
- [6] Yang H, Wang J. Color image contrast enhancement by co-occurrence histogram equalization and dark channel prior[C]. *2010 3rd International Congress on Image and Signal Processing (CISP)*, IEEE, 2010, 2: 659-663.
- [7] Jiang J G, Hou T F, Qi M B. A improved image dehazing algorithm based on dark channel prior [J]. *Journal of Circuits and Systems*, 2011, 16(2): 7-12.
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.
- [8] Chu H L, Li Y X, Zhou Z M, *et al.* Optimized fast dehazing method based on dark channel prior [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2013, 41(4): 791-797.
褚宏莉, 李元祥, 周则明, 等. 基于黑色通道的图像快速去雾优化算法[J]. *电子学报*, 2013, 41(4): 791-797.
- [9] Tarel J P, Hautiere N. Fast visibility restoration from a single color or gray level image [C]. *IEEE 12th International Conference on Computer Vision*, 2009: 2201-2208.
- [10] Wang J D, Zhang W Y, Wang Z R, *et al.* A fast aerial image dehazing algorithm [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2013, 34(3): 636-643.
王敬东, 张文涛, 王子瑞, 等. 一种快速航空图像去雾算法[J]. *航空学报*, 2013, 34(3): 636-643.
- [11] 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(12): 2341-2353.
- [12] van Herk M. A fast algorithm for local minimum and maximum filters on rectangular and octagonal kernels [J]. *Pattern Recognition Letters*, 1992, 13: 517-521.
- [13] Ji X Q, Dai M, Sun L N, *et al.* Research on the image haze removal algorithm based on the prior dark-channel [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2011, 22(6): 926-930.
嵇晓强. 戴明, 孙丽娜, 等. 暗原色先验图像去雾算法研究[J]. *光电子·激光*, 2011, 22(6): 926-930.
- [14] He K M, Sun J, Tang X O. Guided image filtering [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2013, 35(6): 1397-1409.
- [15] Ma Z L, Wen J, Hao L L. Video image dehazing algorithm for surface ship scenes [J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2014, 36(9): 1860-1867.
马忠丽, 文杰, 郝亮亮. 海面舰船场景的视频图像海雾去除算法[J]. *系统工程与电子技术*, 2014, 36(9): 1860-1867.
- [16] Bissonnette L. Imaging through fog and rain [J]. *Optical Engineering*, 1992, 31(5): 1045-1052.
- [17] Dai S B, Xu W, Pu Y J, *et al.* Remote sensing image dehazing based on dark channel prior [J]. *Acta*

- Optica Sinica, 2017, 37(3): 0328002.
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): 0328002.
- [18] Li K, Liu H, Wang D, *et al.* A halo-free algorithm for image dehazing [J]. Computer and Information Technology, 2016, 24(6): 7-11.
李可, 刘辉, 汪丹, 等. 一种消除 halo 效应的去雾算法 [J]. 电脑与信息技术, 2016, 24(6): 7-11.
- [19] Huang X J, Lai Y D, Chen F. Fast single image haze removal algorithm [J]. Computer Application, 2010, 30(11): 3029-3031.
黄晓军, 来彦栋, 陈奋. 快速去除单幅图像雾霾的算法 [J]. 计算机应用, 2010, 30(11): 3029-3031.
- [20] Wang Y T, Feng Z L. Single image fast dehazing method based on dark channel prior [J]. Journal of Computer Applications, 2016, 36(12): 3406-3410.
王雅婷, 冯子亮. 基于暗原色先验的单幅图像快速去雾算法 [J]. 计算机应用, 2016, 36(12): 3406-3410.
- [21] Wang P, Zhang C, Luo Y X. Fast algorithm to enhance contrast of fog degraded in ages [J]. Computer Applications, 2006, 26(1): 152-154.
王萍, 张春, 罗颖昕. 一种雾天图像低对比度增强的快速算法 [J]. 计算机应用, 2006, 26(1): 152-154.
- [22] Oakley J P, Satherley B L. Improving image quality in poor visibility conditions using a physical model for contrast degradation [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1998, 7(2): 167-179.
- [23] Tan R T. Visibility in bad weather from a single image [C]. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2008: 1-8.
- [24] Fattal R. Single image dehazing [J]. ACM Transactions on Graphics (TOG), 2008, 27(3): 1-9.
- [25] Narasimhan S G, Nayar S K. Interactive (de) weathering of an image using physical models [C]. IEEE Workshop on Color and Photometric Methods in Computer Vision, 2003: 1-8.
- [26] Zhu Y H, Fang B, Zhang H Q. Image of road de-weathering based on physical model [J]. Journal of Computer Applications, 2010, 30(1): 156-158.
朱瑜辉, 方滨, 张会清. 基于物理模型的雾霾天道路图像清晰化 [J]. 计算机应用, 2010, 30(1): 156-158.
- [27] Song Y C, Luo H B, Hui B, *et al.* Haze removal using scale adaptive dark channel prior [J]. Infrared and Laser Engineering, 2016, 45(9): 0928002.
宋颖超, 罗海波, 惠斌, 等. 尺度自适应暗原色先验去雾方法 [J]. 红外与激光工程, 2016, 45(9): 0928002.