

doi:10.3788/gzxb20184702.0210001

基于自适应暗原色的单幅图像去雾算法

刘国^{1,2}, 吕群波¹, 刘扬扬¹

(1 中国科学院光电研究院 计算光学成像技术重点实验室, 北京, 100094)

(2 中国科学院大学, 北京, 100049)

摘 要:为了复原雾天退化图像,提出了一种自适应暗原色的单幅图像去雾算法.针对暗原色先验理论在估计图像透射率时不够准确、容易引起 Halo 效应的问题,采用自适应暗原色概念,即在暗原色的获取过程中引入自适应阈值,减小景深变化对暗原色获取的影响,进而正确求取透射率.此过程不需导向滤波的细化,也就避免了导向滤波引起的效率低和去雾不彻底的问题.主观及客观两方面将本文去雾算法与现有算法进行对比,结果表明,本文算法能够有效消除 Halo 效应,获得高对比度、高色彩饱和度以及丰富细节信息的去雾结果,同时也提高了图像去雾效率.

关键词:图像去雾;大气散射模型;暗原色;自适应暗原色

中图分类号:TP391.4

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2018)02-0210001-8

Single Image Dehazing Algorithm Based on Adaptive Dark Channel Prior

LIU Guo^{1,2}, LÜ Qun-bo¹, LIU Yang-yang¹

(1 Key Laboratory of Computation Optical Imaging Technology, Academy of Opto-electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China)

(2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: In order to recover the degraded image induced by the fog or haze, this paper proposes a single image dehazing algorithm based on adaptive dark channel prior. The error during the estimation of transmittance by Dark Channel Prior(DCP) will directly cause Halo effect. To deal with this problem, the notion of Adaptive Dark Channel Prior(ADCP) was proposed, it means using adaptive in the acquisition of DCP, it can reduce the effect brought by the change of depth of focus. So it will obtain the transmittance correctly without the use of Guided Filtering(GF), this means it will avoid low efficiency and defog incomplete caused by the filtering. Experiments show that the improved dehazing algorithm could eliminate the Halo effect and achieve the dehazing image with high contrast, high color saturation and abundant details from both objective or subjective image-quality assessment. Meanwhile, the speed of image process is also improved.

Key words: Image dehazing, Atmospheric scattering model, Dark channel prior, Adaptive dark channel prior

OCIS Codes: 100.2000;100.2980;100.3020;010.1290;010.1310

0 引言

在雾霾天气下,景物反射光会受到悬浮颗粒散射、吸收而衰减,此外太阳光还会经悬浮颗粒散射直接进入成像系统,导致成像系统接收到的图像对比度、颜色饱和度下降,继而给图像的使用增加了难度,比如在目标识别、交通监控、卫星遥感等领域.图像的去雾技术致力于减少雾霾对图像的影响,提升图像的可读性,因此具有一定的实用价值.目前图像的去雾方法主要分为两大类^[1]:图像增强方法和基于物理模型的图像复原

基金项目:国家自然科学基金(No.61505219)和中国科学院国防科技创新基金(No.CXJJ-16S045)资助

第一作者:刘国(1993-),男,硕士研究生,主要研究方向为图像去雾算法研究. Email: liuguo15@ucas.edu.cn

导师(通讯作者):刘扬扬(1976-),女,研究员,博士,主要研究方向为计算光学、光谱成像技术. Email: liuyangyang@aoe.ac.cn

收稿日期:2017-08-23;录用日期:2017-11-24

<http://www.photon.ac.cn>

方法.图像增强方法主要包括灰度直方图均衡化^[2]、小波变化^[3]、Retinex^[4]算法等,此类去雾方法不考虑雾天图像退化的原因,只是在一定程度上增强视觉效果,而且这种增强一般会伴随着一些信息的消失和相应噪声的引入.图像复原的算法主要包括:1)利用景深信息,如 Okley^[5]等假设景深信息已知,由此估计透射率实现去雾.该类方法实现比较复杂,需要借助雷达等仪器对图像中景物的深度信息进行测量,并且参数比较多,去雾过程相对繁琐;Narasimhan^[6]利用二项散射模型从同一场景不同天气条件下的图像中计算出景深信息.但该方法所需图像获取较为复杂,且去雾过程需要人机交互,很难实现实时图像处理;Schechner^[7]等通过同一场景不同偏振方向的图像提取景深信息.该方法只能对偏振相机拍摄的图像进行去雾,并且在浓雾图像进行处理时会失效;2)利用先验条件,近年来此类去雾方法逐渐发展起来,如 Fattal^[8-9]假设雾天图像中大气入射光和物体反射光无关,利用独立成分分析的方法去雾,作为一种颜色统计方法,当雾天图像颜色信息过少,比如颜色单一的天空,海洋等,估计出的景物反射率将会不可靠;Meng^[10]提出了一种通过边界约束粗略估计大气透射率,随后利用正则化方法进一步优化透射率的去雾算法,虽然该算法去雾彻底,尤其体现在景深较远处,但会引起图像中颜色较浅物体的偏色;He^[11]发现暗原色先验理论,并利用其来去雾.但该算法估计大气透射率时比较粗糙,复原出的图像在边缘处有 Halo 效应,因此必须对透射率图进行细化.He 等在去雾算法中引入引导滤波器^[12],获得了不错的复原效果,但引导滤波器的引入带来了效率低和去雾不彻底^[13]的问题.为此本文针对暗原色的获取过程进行改进,提出自适应暗原色概念,该算法能估计出相对正确的大气透射率,而不需进行后续的透射率细化.

1 图像去雾的理论基础

1.1 大气散射模型

McCartney^[14]基于雾天图像的退化过程首先提出了大气散射模型,Narasimhan^[15]随后对该模型进行了改进,改进后的模型因其参数较少,效果显著,现广泛应用于图像去雾领域.大气散射模型可用公式表达为

$$E(d, \lambda) = E_0(\lambda)e^{-\beta(\lambda)d} + E_\infty(\lambda)(1 - e^{-\beta(\lambda)d}) \quad (1)$$

式中, $E(d, \lambda)$ 表示距离为 d 时进入成像系统的总光强, $\beta(\lambda)$ 表示大气散射系数, d 是景物与成像设备间的距离, $E_0(\lambda)$ 表示景物反射光, $E_\infty(\lambda)$ 是无穷远处的大气光强.大气散射模型主要包含两个部分:衰减模型和大气光模型,衰减模型主要阐述了景物反射光经雾霾颗粒散射吸收后光强损失的过程,即式(1)右侧第一项,大气光模型描述了太阳光经雾霾颗粒散射进入成像设备的过程,即式(1)右侧第二项.

由 Rayleigh 大气散射定律可知,大气散射能力与光波长有关,为

$$\beta(\lambda) = \frac{1}{\lambda^\gamma} \quad (2)$$

式中, $0 \leq \gamma \leq 4$,在晴朗的天空中,空气中颗粒较小,此时 $\gamma = 4$;而在雾霾天气下,空气中水滴等颗粒相对可见光波长非常大,此时 $\gamma = 0$,即大气散射能力与光波长无关,因此对大气散射模型式(1)简化^[16],并作相应的替换,对应到数字图像中, $I(i, j) = E(\lambda, d)$, $D^{\text{Object}}(i, j) = E_0(\lambda)$, $A_\infty = E_\infty(\lambda)$, $t(i, j) = e^{-\beta(\lambda)d}$;变换后的大气散射模型为

$$I(i, j) = D^{\text{Object}}(i, j)t(i, j) + A_\infty(1 - t(i, j)) \quad (3)$$

式中, $I(i, j)$ 是雾天图像在像素点 (i, j) 处的光强, $D^{\text{Object}}(i, j)$ 是该像素点待恢复的无雾图像的光强, $t(i, j)$ 表示该像素点的透射率, A_∞ 表示无穷远处大气光强.

图像的去雾即从雾天的图像 I 中恢复出无雾图像 D^{Object} 的过程,变换式(3)可得

$$D^{\text{Object}}(i, j) = \frac{I(i, j) - A_\infty}{t(i, j)} + A_\infty \quad (4)$$

因此,想要恢复出无雾图像,需要从仅有的原雾天图像中获得无穷远处大气光强 A_∞ 以及各个像素点的透射率 $t(i, j)$,这是需要辅助信息或者先验条件.

1.2 暗原色先验理论

He 暗原色先验理论是对大量户外无雾图像进行数理统计后得到的一个先验规律.该理论指出:在绝大多数无雾图像的局部区域,总存在某些像素的 RGB 三通道中某个通道的值很低,接近于 0.即

$$D_{\text{dark}} = \min_{c \in \{R, G, B\}} \min_{i'j' \in \Omega(i, j)} [D^c(i', j')] \rightarrow 0 \quad (5)$$

式中, $\Omega(i, j)$ 表示以 (i, j) 为中心的局部区域, 雾天图像会有大气光进入成像系统, 因此雾天图像的暗原色相对无雾图像的会偏大, 可以用于粗略估计透射率, 即将式(5)代入式(3)中

$$\min_{c \in \{R, G, B\}} \min_{i', j' \in \Omega(i, j)} [I^c(i, j)] = A_\infty [1 - t(i, j)] \quad (6)$$

由此可以估计图像的透射率为

$$t(i, j) = 1 - \frac{\min_{c \in \{R, G, B\}} \min_{i', j' \in \Omega(i, j)} [I^c(i, j)]}{A_\infty} \quad (7)$$

式中 $\min_{c \in \{R, G, B\}} \min_{i', j' \in \Omega(i, j)} (I^c(i, j))$ 表示雾天图像的暗原色, A_∞ 的值由暗原色中光强前 0.1% 的像素点的平均光强决定。此外, 由于晴朗的天空中也含有一定的水汽和固体小颗粒, 彻底的去雾会造成图像的失真, 因此在式(7)引入常量 ω , 依照常规, 本文中去雾算法的 ω 取值为 0.95^[17]。当透射率 t 取值很小时, 会造成恢复图像的过饱和颜色的失真, 本文中 t 的取值范围为 $[0.1, 1]$ 。综上, 透射率的表达式为

$$t(i, j) = \min(1, \max(0.1, 1 - \omega \frac{\min_{c \in \{R, G, B\}} \min_{i', j' \in \Omega(i, j)} (I^c(i, j))}{A_\infty})) \quad (8)$$

2 去雾算法的改进

2.1 自适应暗原色原理

使用暗原色先验理论去雾时, 容易引起 Halo 效应, 如图 1(b)。由第二节大气散射模型可知, 图像暗原色与景物深度信息相关, 景物越近, 暗原色的值越小, 景物越远, 暗原色的值越大^[18]。当滤波器矩形滑窗遍历到景深变化较为缓慢的区域时, 暗原色的求取正确, 但当滑窗遍历到景深变化剧烈的位置时, 滑窗中同时存在两个景深的物体, 此时景深较远的像素点的暗原色就会取较近处像素点的暗通道值, 从而造成透射率的所求值偏大, 复原出无雾图像的光强增大, 在图像上直观表现为在景深较大处的边缘会产生白色光圈, 这就是 Halo 效应易发生在景深变化剧烈处的原因。



图 1 滤波与未滤波去雾效果对比

Fig.1 Comparison of dehazing results with or not with GF

为了消除 Halo 效应, He 等使用引导滤波器对透射率进行细化, 复原出的去雾效果如图 1(c)。引导滤波器完美的解决了 Halo 效应, 但也引入了新的问题。

首先引导滤波器耗费时间比较长, 在 He 的算法中相当大的一部分时间被花费到了透射率细化上; 其次经过引导滤波器后的去雾图像去雾不彻底, 对比图 1(b) 和图 1(c) 可以明显地感受到, 这是因为引导滤波器在细化透射率的过程中, 将原透射率做了一定程度的平滑, 不仅改变了“白边”处需要改变的透射率, 也改变了别处不需要改变的透射率。如图 1(a) 方框区域 I 内, 暗原色计算出的透射率平均值与经过引导滤波器后该区域的透射率平均值分别为 0.3849、0.5581。Halo 效应产生的源头是暗原色取值的不准确, He 等人通过细化透射率来抵消错误求取的暗原色所带来的影响。

本文提供另一种思路: 改进暗原色的求取过程, 求取不受景深影响的暗原色值。本文提出自适应暗原色的概念, 用来代替 He 的暗原色。由上面的分析可知, 景深是引起图像暗通道灰度值变化的主要原因, Halo 效应就是因为景深较远的像素点的暗原色取了较近处像素点的暗通道值而导致的, 因此当像素邻域与该像素

的暗通道灰度值的差值大于一定阈值 K 时,认定此临域像素与该像素不具有相同的景深,在求取暗原色时剔除该临域像素,从而去除景深变化的影响,估计出正确的暗原色值,进而正确的计算出透射率,直接复原图像,不需要经过引导滤波。

自适应暗原色的获取步骤如下:

1)求取各像素点的暗通道值,即求取各像素点的 RGB 三通道最小值

$$\text{channel} = \min_{c \in (R,G,B)} (I^c) \quad (9)$$

2)计算各临域像素点与中心点的暗通道光强差值 a

$$a = \frac{\text{abs}[\text{channel}(i',j') - \text{channel}(i,j)]}{\text{channel}(i,j)} \quad (10)$$

其中 $\Omega(i,j)$ 表示以 (i,j) 为中心的局部区域。

3)进行甄别,当差值 a 不大于阈值 K 时,认为该像素点与中心点在同一景深范围,该像素点亮度不变,否则认为该像素点与中心点不在同一景深范围,为了消除该点影响,将该像素点光强变为极大值,对于一幅 8 位图像来说,极大值取 255,为

$$\text{channel}(i',j') = \begin{cases} 255 & a > K; \\ \text{channel}(i',j') & a \leq K \end{cases} \quad (11)$$

4)最后,对自适应过后的暗通道取最小值

$$b = \min_{(i',j') \in \Omega(i,j)} [\text{channel}(i',j')] \quad (12)$$

b 即为所求自适应暗原色值。

2.2 阈值 K 的确定

阈值 K 的大小决定了本文算法去雾效果的优劣,一个合适的 K 值必须使去雾后的图像不失真,且不产生 Halo 效应,这也就要求透射率图保存足够多的景深信息。 $K=0$ 时的透射率图等价于通过 RGB 三通道最小值 (Minimum of RGB Channel, MC) 计算出的透射率图,此时可认为透射率图保存了完整的景深信息; $K=100\%$ 时的透射率图等价于由暗原色 (未经导向滤波) 所求出的透射率图,根据上文的分析可知,在景深变化剧烈区域,暗原色估计错误,也就导致透射率图在该区域保存的景深信息错误。因此本文对多幅易产生 Halo 效应的雾天图像进行统计,对 $K=0$ 及 $K=100\%$ 两幅透射率图进行

二值化处理,并找出其中差异区域,随后 K 以步长 1% 在 $0 \sim 100\%$ 区域内进行取值,计算出每个 K 值透射率图在差异区域与 $K=0$ 时透射图的相似度。多幅图像相似度平均值见图 2。

由图 2 可知,当 K 取 $0 \sim 10\%$ 时,自适应透射率图在差异区域的取值准确率非常高,并且变化较为缓慢,说明此时透射率图很好地保存了景深信息;随着 K 值的增大,准确率下降加快,透射率图保存的边缘信息不再完整;当 K 取 70% 左右时,准确率接近于 0,此时差异区域透射率取值基本错误,即该区域反映的景深信息错误。由于暗原色原理是对图像像素临域而非单个像素适用,因此 K 值应在保证保存足够多景深信息的前提下取较大值,从而防止所得暗原色值失效。综上所述,本文自适应暗原色算法中阈值 K 初步选定为 10% 。

进一步验证 K 取 10% 是否正确,对易产生 Halo 效应的雾天图像进行去雾处理,图 3(a)、(f) 为雾天图像,图 3(b)~(e)、3(g)~(j) 分别是 $K=10\%$ 、 $K=15\%$ 时本文算法去雾后的图像及它们的细节部分,图 4(a)~(d)、4(e)~(h) 分别是由三通道最小值图、传统暗原色图、暗原色导向图、 $K=10\%$ 时自适应暗原色图所得到的透射率图。观察图 4 发现:图 4(d)、(h) 细节基本与图 4(a)、(e) 中保持一致,优于图 4(c)、(g),且透射率值的大体分布与图 4(c)、(g) 相比更加接近于图 4(b)、(f) (在暗原色原理正确的前提下,图 4(b)、(f) 透

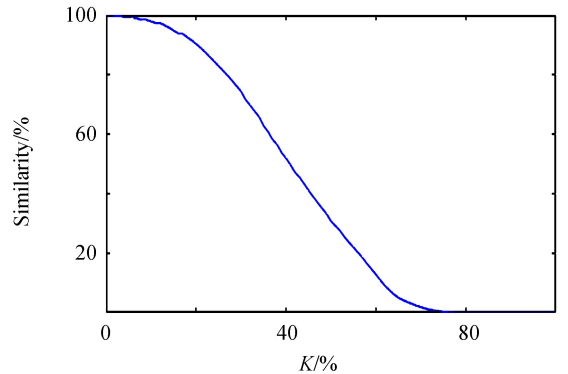


图 2 不同 K 值下相似度平均值
Fig.2 The mean of similarity with different K

射率取值是准确的),去雾后的图像 3(b)、(g)对比度提高,细节增多,图像没有偏色、失真,且没有产生 Halo 效应.随着 K 值的增大,Halo 效应愈加明显,正如图 3(c)、(h)所示,因此认定 K 取值 10%是合理、可靠的.

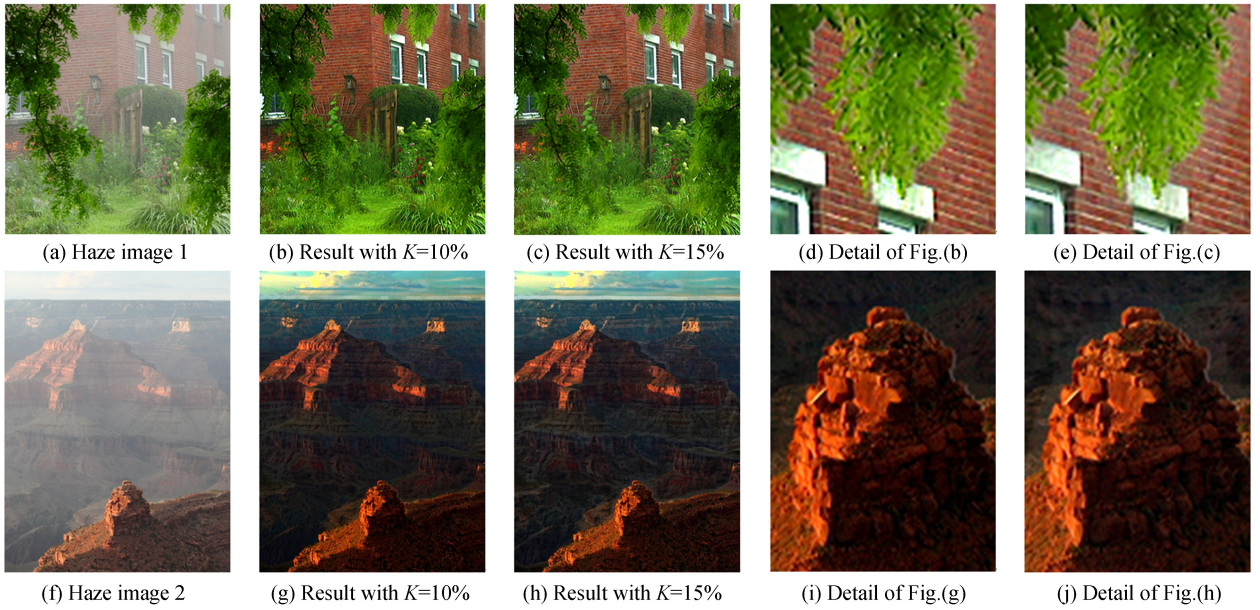


图 3 $K=10\%$ 和 $K=15\%$ 时去雾效果

Fig.3 Dehazing results with $K=10\%$ or $K=15\%$

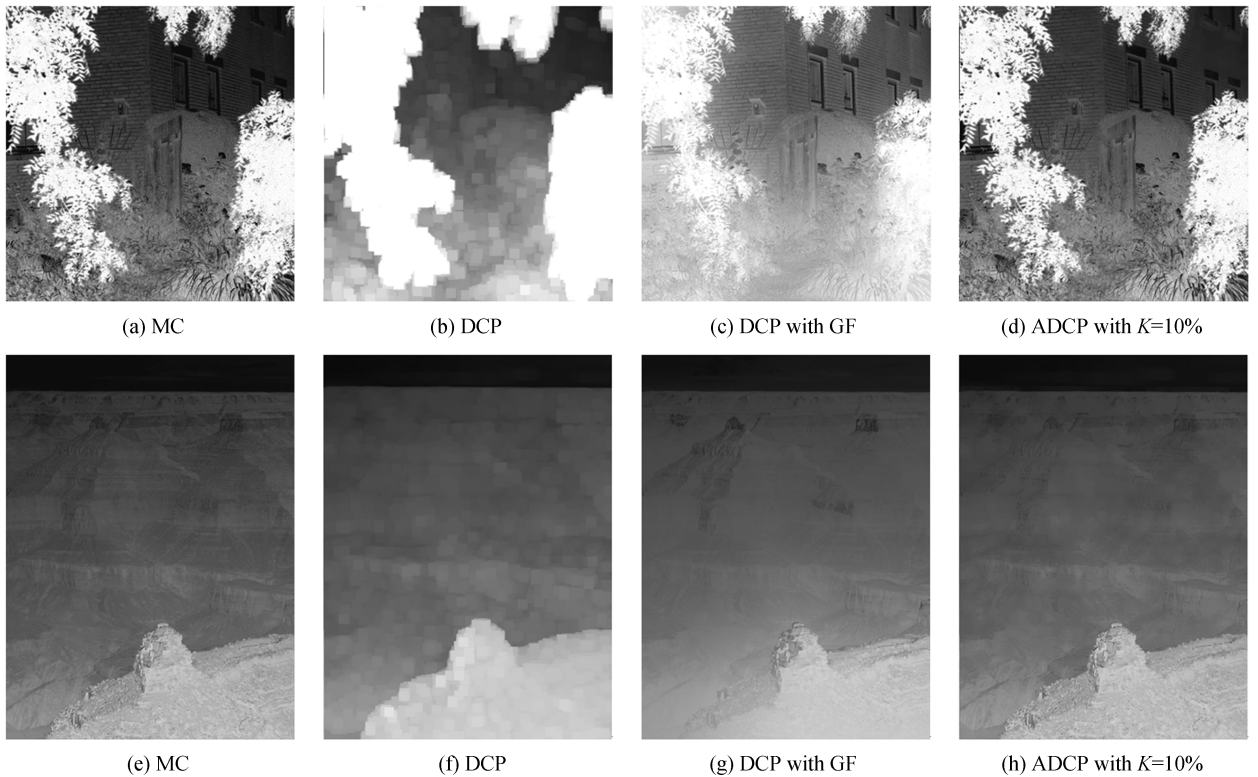


图 4 透射率图对比

Fig.4 Comparison of transmission map

3 实验结果与分析

本文仿真实验的硬件条件为: Intel(R) Core(TM)2 Quad CPU Q9550 @2.83GHz; RAM 4Gb; 软件条件: Matlab2015b.选择 2 幅具有代表性的雾天图像进行对比试验,雾天图像既包含天空区域,又包含景深变化剧烈区域,此外一幅图像色彩单一而另一幅较为丰富,选取图像去雾领域内比较有代表性的文献[9]、文献

[10]、文献[12]中算法进行对比.

3.1 去雾效果对比

对比不同算法的去雾效果,首先比较景深变化剧烈区域,四种算法的去雾图像在草垛、树叶边缘等区域都没有产生明显的 Halo 效应;在远景区域的去雾效果上,文献[10]算法去雾更彻底,但在该区域出现明显的偏色,尤其在天空区域更为明显;文献[9]算法的去雾图像亮度失常,第一幅近景处亮度偏大,但主观效果良好,而第二幅则整体偏暗.本文算法和暗原色先验方法去雾后的图像还原度比较高,没有出现明显偏色和失真的情况,但在远景处去雾效果上还需提升,这是本文算法需要改进的地方.对比本文和文献[12]算法,在比较远处草垛处以及第二幅图像的建筑区域,文献[12]算法去雾后的图像依旧是“灰蒙蒙”的,而本文算法去雾后的图像则相对清晰,且色彩饱和度也有所提高.

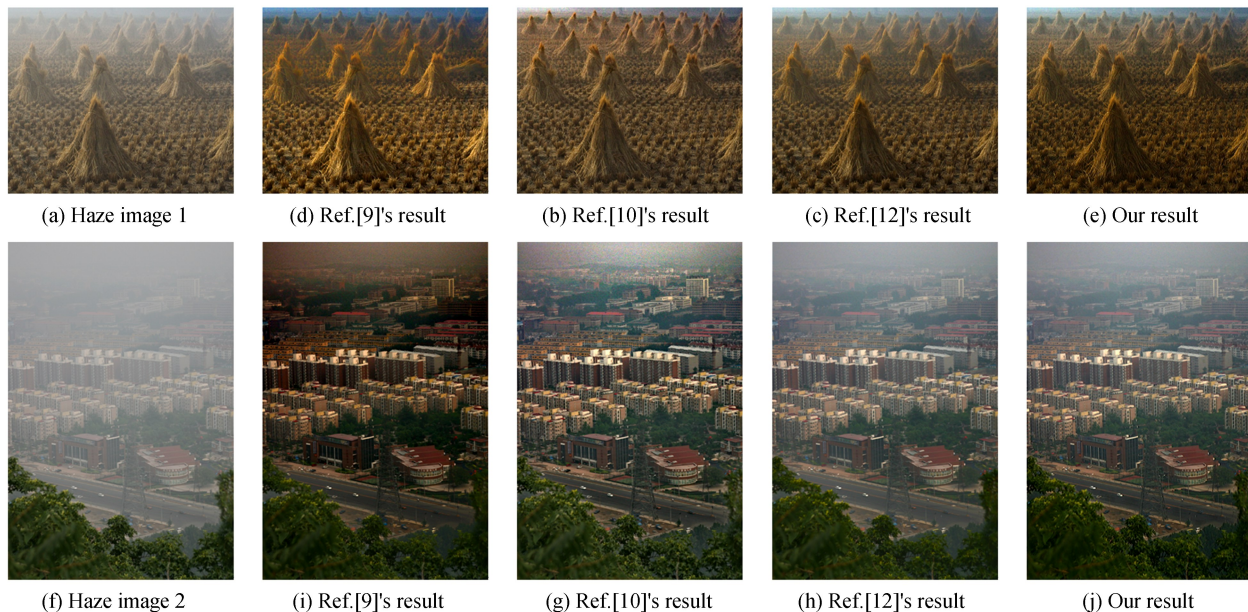


图 5 去雾效果对比

Fig.5 Comparison of dehazing results

为了更加客观公正地对比本文算法和文献[12]算法的去雾效果,使用常用于图像去雾效果盲评价的三个评价函数:图像熵(H),对比度(C)和新增可见边之比(e).图像熵描述了图像的平均信息量,为

$$H(X) = E\left[\log \frac{1}{p(a_i)}\right] = -\sum_{i=1}^n p(a_i) \log p(a_i) \quad (13)$$

对于一幅 256 灰度级的图像来说,当像素点平均分布在 256 个灰度级上时,图像细节最多,图像熵最大,当所有像素点集中于某一灰度级,图像没有细节信息,图像熵最小,为 0.

图像的对比度指一幅图像灰度反差的大小,对比度表达式为

$$C = \sum_{\delta} \delta(i, j)^2 P_{\delta}(i, j) \quad (14)$$

式中 $\delta(i, j)$ 表示相邻像素的灰度差, $P_{\delta}(i, j)$ 表示灰度差为 δ 的概率.

新增可见边之比的公式表达式为

$$e = \frac{n_r - n_0}{n_0} \quad (15)$$

式中, n_0 、 n_r 分别表示雾天图像的可见边和去雾图像的可见边数目.对图 3(a)、(f)、5(a)、(f) 四幅雾天图像去雾后的评价参数见表 1.

表 1 各客观评价参数数值对比

Table 1 Comparison of different evaluating values

	H			C			e/%	
	Haze	Ref.[12]	Our	Haze	Ref.[12]	Our	Ref.[12]	Our
Fig.1	7.255	7.263	7.293	235.934	373.557	629.15	12.306	27.207
Fig.2	7.120	6.951	7.040	117.965	209.715	321.127	19.462	22.663
Fig.3	7.141	6.968	6.987	3.992	85.197	98.304	188.636	200.254
Fig.4	6.812	7.258	7.351	3.936	144.179	170.394	68.097	69.172

由表 1 可知,相较于原图,文献[12]算法和本文算法去雾后图像在熵、对比度以及新增可见边之比上都有一定程度的提升.总体上,本文提升的幅度更大,与主观观测的结果相一致,因此本文的去雾算法大体优于文献[12]算法.

3.2 去雾时间对比

除了在去雾效果上进行对比,本文还在算法效率上进行了对比,各算法处理四幅图像所花费的时间见表 2.

表 2 不同算法去雾时间对比

Table 2 Comparison on run time with different method

	Fig.1(441×450)/s	Fig.2(465×384)/s	Fig.3(450×600)/s	Fig.4(400×598)/s
Ref.[9]	41.25	39.66	58.10	78.59
Ref.[10]	6.12	5.47	7.03	6.51
Ref.[11]	17.57	16.15	24.83	21.34
Ref.[12]	1.82	1.60	2.45	2.14
Our	1.38	1.23	1.78	1.59

从表 2 可知,文献[9]、文献[11]算法效率较低,文献[10]效率一般,He 在文献[12]中使用引导滤波器替代文献[11]中 soft matting 细化透射率,效率上提高了 10 倍左右,本文中引入自适应暗原色,省略了引导滤波环节,在效率上有了进一步的提高,相比文献[11]提高了 13 倍左右,相比文献[12]提高了 1/4 左右,因此与现有算法相比,本文算法在效率上有一定的提升.

4 结论

对暗原色先验理论的去雾算法作了深入了解,并详细介绍了暗原色先验理论引起 Halo 效应的本质,进而从根本上消除了 Halo 效应,而不必引入引导滤波器,在算法效率上有了一个明显的提升.并且由于没有引入滤波器,在计算透射率图时能显示更多的细节,图像去雾后边缘恢复效果优于 He 的算法,对比度更高,去雾效果更好.

参考文献

- [1] WANG Rui, LI Rui, LIAN Xiao-qin. Multiple scattering model based image dehazing with superpixel[J].*Acta Photonica Sinica*, 2016, **45**(4): 0410002.
王睿, 李蕊, 廉小亲. 基于大气多散射模型和超像素分割的图像去雾[J]. 光子学报, 2016, **45**(4): 0410002.
- [2] LIU Zu-jun, LIU Chun-liang, LIANG Zhi-hu, et al. Contrast enhancement method on dynamic histogram equalization [J]. *Optical Technique*, 2005, **31**(3): 376-379.
刘祖军, 刘纯亮, 梁虎, 等. 基于动态直方图均匀化的对比度增强方法[J]. 光学技术, 2005, **31**(3): 376-379.
- [3] WANG Ping, ZHANG Chun, LUO Ying-xin. Fast algorithm to enhance contrast of fog degraded images[J].*Computer Applications*, 2006, **26**(1): 152-154.
王萍, 张春, 罗颖昕. 一种雾天图像对比度增强的快速算法[J]. 计算机应用, 2006, **26**(1): 152-154.
- [4] JOBSON D, RAHMAN Z, WOODSELL G. A multiscale retinex for bridging the gap between color images and the human observation of scenes[J].*IEEE Transactions on Image Processing*, 1997, **6**(7): 966-972.
- [5] OAKLY J P, SATHERLEY B L. Improving image quality in poor visibility conditions using model for degradation[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 1988, **7**(2): 167-179.
- [6] NARASIMHAN S G, NATAR S K. Vision and the atmosphere[J].*International Journal of Computer Vision*, 2002, **48**(3): 233-254.
- [7] SCHECHNER Y Y, NARASIMHAN S G, NATAR S K. Polarization-based vision through haze[J].*Applied Optics*, 2003, **42**(3): 511-525.

- [8] FATTAL R. Single image dehazing[J]. *ACM Transactions on Graphics*, SIGGRAPH, 2008, **27**(3): 1-9.
- [9] SULAMIM, GELTZER I, FATTAL R, *et al.* Automatic recovery of the atmospheric light in hazy images [C]. Proceeding of IEEE International Conference on Computational Photography. Beijing, China, 2014: 76-86.
- [10] MENG Gao-feng, WANG Ying, DUAN Jiang-yong, *et al.* Efficient image dehazing with boundary constraint and contextual regularization[C]. Proceeding of IEEE International Conference on Computer Vision. Sydney, Australia, 2013:617-624.
- [11] HE Kai-ming, SUN Jian, TANG Xiao-ou. Single image haze removal using dark channel prior[C]. Proceeding of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Washington, USA, 2009: 1956-1963.
- [12] HE Kai-ming, SUN Jian, TANG Xiao-ou. Guided image filtering[C]. Proceedings of the 11th European Conference on Computer Vision. Heraklion, Greece, 2010: 1-14.
- [13] TENG Yu, RIAZ I, SHIN H. Real-time single image dehazing using block-to-pixel interpolation and dark channel prior [J]. *IET Image Process*, 2015, **9**(9): 725-734.
- [14] MCCARTNEY E J. Optics of the atmosphere; scattering by molecules and particles[J]. *John Wiley and Sons*, 1976, **12**(5): 123-129.
- [15] NARASIMHAN S G, NAYAR S K. Vision and the atmosphere[J].*International Journal of Computer Vision*, 2002, **48**(3): 233-254.
- [16] CHEN Lu, HE Hong-jie, CHEN Fan. A fast image defogging algorithm based on edge-maximum filter[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(11): 1110003.
陈露, 和红杰, 陈帆. 基于边界临域最大值滤波的快速图像去雾算法[J]. 光子学报, 2014, **43**(11): 1110003.
- [17] SONG Ying-chao, LUO Hai-bo, HUI Bin, *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. 尺度自适应暗通道先验去雾方法[J]. 红外与激光工程, 2016, **45**(9): 0928002.
- [18] CHEN Shu-zhen, REN Zhan-guang, LIAN Qiu-sheng. Single image dehazing algorithm based on improved dark channel prior and guided filter[J].*Acta Automatica Sinica*, 2016, **42**(3): 455-465.
陈书贞, 任占广, 练秋生. 基于改进暗通道和导向滤波的单幅图像去雾算法[J]. 自动化学报, 2016, **42**(3): 455-465.