

文章编号:1007-2780(2016)08-0831-09

基于暗原色与逆暗原色融合的含明亮区域图像去雾

龚昌来^{1*}, 罗 聪¹, 申志强²

(1.嘉应学院 电子信息工程学院,广东 梅州 514015; 2.解放军 96311 部队,湖南 靖州 418400)

摘要:针对暗原色先验模型对于图像明亮区域不适应,暗原色估计偏大,导致透射率估计偏小,出现色彩失真现象,本文介绍一种新的暗原色修正方法。提出一种逆暗原色概念,将雾化图像的暗原色与逆暗原色进行融合处理得到一种新的修正暗原色,从而获得比较真实的明亮区域透射率,有效消除了明亮区域的色彩失真。以有效细节强度、色调还原程度、结构信息及综合测评作为图像质量评价指标,与目前流行算法进行对比实验,本文算法的色调还原程度指标平均值提高 41.1%,综合测评指标平均值提高 48.7%。实验结果表明,本文算法在改善明亮区域色彩失真及提高去雾图像总体质量方面优于目前流行算法。

关 键 词:图像去雾;暗原色先验;逆暗原色;明亮区域

中图分类号:TP391 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/YJYXS20163108.0831

Haze removal algorithm for image with bright region based on dark channel and inverse dark channel fusion

GONG Chang-lai^{1*}, LUO Cong¹, SHEN Zhi-qiang²

(1. School of Electronic & Information Engineering, Jiaying University, Meizhou 514015, China;
2. Unit 96311 of PLA, Jingzhou 418400, China)

Abstract: Aiming at the problem that dark channel prior model does not suit the image bright region, since dark channel estimate is too small, the estimated transmittance is small, and color distortion occurs, a new method for correcting dark channel has been proposed. One kind of inverse dark channel concepts have been proposed, dark channel and inverse dark channel of the haze image are fused to get a new dark channel, thereby obtaining more real bright area transmittance, effectively eliminating color distortion in the bright region. Effective strength of the details, the degree of reduction of tone, structure information and comprehensive evaluation as the image quality evaluation index, compared with the current popular algorithms, the average value of tonal reproduction degree is improved by 41.1% and the average comprehensive evaluation is increased by 48.7%. Experimental results show that proposed method is superior to the current popular algorithms in improving the color distortion of

收稿日期:2016-03-30; **修订日期:**2016-05-11.

基金项目:广东省自然科学基金资助项目(No.S2012010010368)

Supported by Natural Science Foundation of Guangdong Province of China(No. S2012010010368)

* 通信联系人, E-mail: dzxgcl@sohu.com

the bright region and improving the overall quality of the image haze removal.

Key words: image haze removal; dark channel prior; inverse dark channel; bright region

1 引言

在雾天环境下,由于光在大气中传播时受到悬浮颗粒的吸收和散射,使可见光成像系统所捕获的图像出现模糊不清、对比度下降等退化现象,会导致诸如高速公路视频监控等机器视觉系统无法正常工作,因此图像去雾研究具有重要的现实意义。

图像去雾方法很多,从去雾的不同研究角度大致可以分为两类:一类为图像增强,另一类为图像修复^[1]。图像增强方法分为图像对比度增强和图像颜色增强,即图像锐化;图像修复方法主要是基于大气散射物理模型,该方法需要更多的额外信息^[2]。近年来,基于大气散射模型和统计先验求解的单幅图像去雾的研究取得了很大进展,成为国内外研究热点。2009年,He等^[3]通过对大量户外自然图像的观察统计,提出了暗原色先验的单幅图像去雾方法,该方法直观简单,在处理单幅户外场景图像去雾方面取得了较好的效果,得到了业内学者的广泛认同。但是该方法存在局限性,对于明亮区域,暗原色先验模型不成立,暗原色估计偏大,导致透射率估计偏小,恢复图像出现色彩失真,使图像的视觉效果变差。近年来,许多学者对其进行改进,取得了一些成果。2010年,Codruta等^[4]提出一种半逆法检测去雾算法,该算法利用求反算子将图像转化到CIE $L^*c^*h^*$ 空间,进而检测出有雾区域,实现分层对比度拉伸,虽然检测出的有雾区域较为精准,但因为其缺乏物理有效性,导致去雾结果中容易出现对比度过度增强的区域^[5]。

李加元等^[6]根据天空区域一般具有面积大、颜色值较亮且平滑等特点,提出一种天空识别算法将雾化图像划分为天空与非天空部分,对其分别估计透射率图并分别进行合适的去雾处理。雷琴等^[7]提出一种基于天空区域分割的海面单幅图像去雾方法,将均值漂移方法与嵌入置信度的边缘检测方法相结合进行图像分割,分割后的图像用形态学膨胀与腐蚀操作进行二值化,提取出天空区域和非天空区域。对天空区域使用限制对比

度直方图均衡算法去雾,非天空区域使用基于引导滤波的暗原色先验算法去雾。王广义等^[8]采用基于梯度阈值的方法对天空分割,将天空区域的透射率设定成一个经验值。以上方法都是基于图像分割,其去雾及消除天空色彩失真的效果依赖于图像分割的准确度,由于实际雾化图像的复杂性导致很难精确分割出天空区域,因此其效果难以达到最佳。此外,这种分割处理方法,也会增加计算量。蒋建国等^[9]通过引入一种容差机制,对明亮区域进行识别,将明亮区域的透射率乘以一个系数进行提升修正,避免在处理这些区域时产生色彩失真。该方法计算简单,比较有效的改善明亮区域色彩失真,是目前流行的一种算法。孙小明等^[10]对蒋建国方法进行改进,通过判断大气光强度和暗通道差值绝对值大小来判断雾化图像中是否含有明亮区域。张登银等^[11]提出一种基于亮度上限阈值和透射率下阈值的双阈值明亮区域识别和透射率修正方法,对明亮区域识别更准确,也是对蒋建国方法的一种改进。以上容差机制及改进方法虽然有效,但由于容差系数的选择都是采用经验值,只对某些图像有效,不具备普适性。此外,实验发现容差机制方法对明亮区域透射率提升能力不强,恢复图像的明亮区域仍存在不同程度的色斑,不能完全消除明亮区域色彩失真。

在暗原色先验方法中,对暗原色的修正其本质上是对透射率的修正,本文采用对暗原色修正的方法对原算法进行改进。针对明亮区域提出一种逆暗原色概念,将雾化图像的暗原色与逆暗原色进行融合处理获得一种修正暗原色,使之适应于整幅图像的去雾处理,取得了较好效果。

2 暗原色先验去雾算法

在计算机视觉与图像处理中,广泛采用的雾化图像大气散射模型为^[12]:

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

式中: $I(x)$ 为观测到的雾化图像, $J(x)$ 表示清晰无雾图像, A 是大气光强度, $t(x)$ 为场景的透射率, $0 \leq t(x) \leq 1$ 。

对于户外图像 J , 其暗原色定义为:

$$J^{\text{dark}}(x) = \min_{y \in \Omega(x)} \left(\min_{c \in \{R, G, B\}} J^c(y) \right), \quad (2)$$

式中: J^c 代表 J 的某一个颜色通道, $\Omega(x)$ 是以 x 为中心的局部区域。He 通过统计得出暗原色先验规律^[3]: 如果 J 是户外的无雾图像, 除了天空区域, 暗原色 J^{dark} 的强度总是很低并且趋近于 0。

在区域 $\Omega(x)$ 对式(1)中的各项取最小运算, 并根据暗原色先验: $J^{\text{dark}}(x) \rightarrow 0$, 可得到透射率的估计值 $\tilde{t}(x)$ 为:

$$I^{\text{dark}}(x) = \min_{y \in \Omega(x)} \left(\min_{c \in \{R, G, B\}} I^c(y) \right), \quad (3)$$

$$\tilde{t}(x) = 1 - \omega \frac{I^{\text{dark}}(x)}{A}, \quad (4)$$

式中 ω 为修正参数, 一般取 0.95, 使去雾后的复原图像显的更为自然。 $\tilde{t}(x)$ 是在区域 $\Omega(x)$ 中透射率不变的条件下推导而来的, 存在明显的分块现象, 会造成复原图像在场景深度不一致的边缘区域出现光晕, 因此, 需对式(4)的粗略透射率 $\tilde{t}(x)$ 进行优化, 得到细节明显的透射图。关于透射率细化方法, 有许多学者提出, 如引导滤波、最小滤波、各向异性高斯滤波等^[13-15], 本文采用引导滤波法, 引导滤波是一种边缘保持滤波, 在运算中通过引入盒式滤波 (boxfilter) 技术形成一种快速滤波器, 可实现对雾化图像透射率快

速细化。设细化后的透射率为 $t(x)$, 根据式(1)可得到去雾后的图像 $J(x)$ 为:

$$J(x) = \frac{I(x) - A}{\max(t(x), t_0)} + A, \quad (5)$$

式中: t_0 为透射率最小临界值, 一般取 0.1。大气光 A 的估计方法为: 先取暗原色中 0.1% 亮度最大的像素, 然后取这些像素对应在原图中的最大值作为 A 的值。

对于大多数户外无明亮区域的雾化图像, 上述暗原色先验方法能取得非常好的效果。但对于含有明亮区域的雾化图像, 暗原色先验算法效果不佳。图 1 所示为本文一个实验例子, 图 1(c) 下部的非天空区, 暗原色先验方法去雾效果好, 但在上部的天空明亮区域, 暗原色 $I^{\text{dark}}(x)$ 估计偏大, 图 1(b) 所示暗原色图的上部天空区呈白色, 导致透射率 $\tilde{t}(x)$ 估计偏小, 去雾后天空区域图像出现过度饱和, 通道间颜色值的差异扩大, 从而产生马赛克状色斑, 出现色彩失真, 如图 1(c) 上部区域所示。

对于天空明亮区域, $I^{\text{dark}}(x)$ 值较大, 若取 $\omega = 1$, 则当 $I^{\text{dark}}(x) > A$ 时, 由式(4)可知透射率 $\tilde{t}(x) < 0$, 根据大气散射理论, 透射率取值范围应为 0~1, 因此, 暗原色先验模型失效。由此可见, 暗原色先验方法对明亮区域的暗原色必须进行修正。

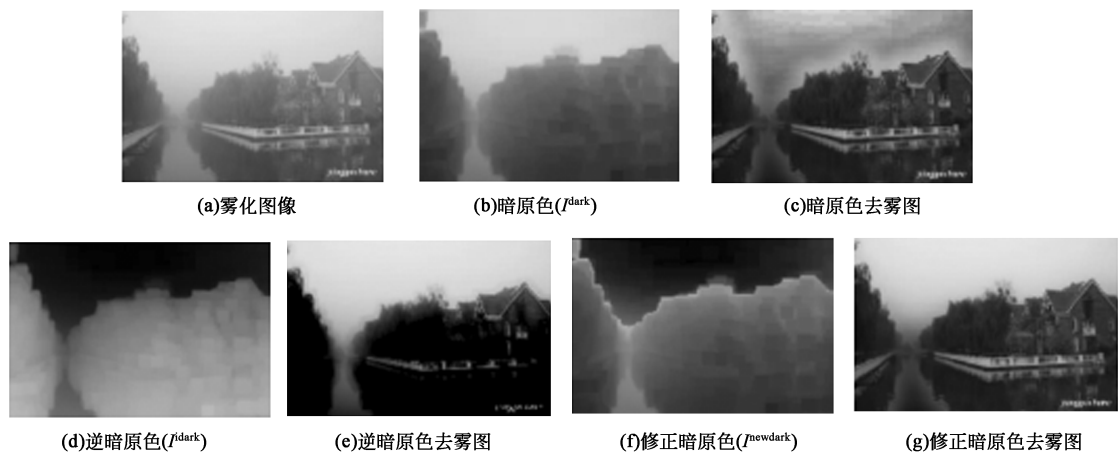


图 1 暗原色与逆暗原色及去雾效果图

Fig.1 Dark channel, inverse dark channel and effect of haze removal

3 暗原色修正算法

本文对暗原色修正的策略为: 对非明亮区域, $I^{\text{dark}}(x)$ 保持不变; 对明亮区域, 采取措施

将 $I^{\text{dark}}(x)$ 变小, 使 $\tilde{t}(x)$ 增大, 以获得比较真实的透射率。为此, 本文提出一种逆暗原色概念, 设一幅图像的暗原色为 $I^{\text{dark}}(x)$, 逆暗原色 $I^{\text{dark}}_{\text{inv}}(x)$ 定义为:

$$I^{\text{dark}}_{\text{inv}}(x) = \max(I^{\text{dark}}(x)) - I^{\text{dark}}(x), \quad (6)$$

式中： $\max(I^{\text{dark}}(x))$ 为整幅图像的最大暗原色值。由式(6)可知，逆暗原色是通过暗原色求反后获得，暗原色越大，则逆暗原色越小，反之亦然。引入逆暗原色概念，并将逆暗原色替代暗原色可实现对明亮区域暗原色变小目的，从而获得比较真实的明亮区域透射率。图 1(d)所示为逆暗原色 $I^{\text{idark}}(x)$ 图，其天空部分值变小而呈黑色，以逆暗原色 $I^{\text{idark}}(x)$ 替代暗原色 $I^{\text{dark}}(x)$ 去雾后的图像见图 1(e)。由图 1(e)可见，虽然图像下部的非天空区域恢复较差，图像变黑，但图像上部的天空区域恢复较好，无色彩失真现象。大量的实验结果表明：以逆暗原色替代暗原色去雾可使图像明亮区域获得比较真实的透射率，克服色彩失真现象，但是逆暗原色去雾也存在局限性，不适应于非明亮区域。根据暗原色与逆暗原色各自适应的区域不同，互为相反，本文对二者进行融合处理，构

成一种新的暗原色，使之能适应于整幅图像的去雾处理。

设雾化图像 $I(x)$ 的暗原色为 $I^{\text{dark}}(x)$ ，逆暗原色为 $I^{\text{idark}}(x)$ ，融合后的暗原色为 $I^{\text{newdark}}(x)$ 。一种最简单的融合方法是取 $I^{\text{dark}}(x)$ 与 $I^{\text{idark}}(x)$ 中的最小值，即

$$I^{\text{newdark}}(x) = \min[I^{\text{dark}}(x), I^{\text{idark}}(x)] \quad (7)$$

图 2 所示为 3 幅实景图像的去雾测试结果图。由图 2(c)可见采用式(7) $I^{\text{newdark}}(x)$ 去雾后，天空区的色彩失真基本消除，远离天空区的部分图像去雾效果好，但接近天空区的部分图像去雾能力下降去雾效果差，导致去雾图像的总体质量仍然不高。

为了在消除明区域色彩失真的同时提高去雾能力，在大量实验结果的基础上，本文提出如下融合规则：

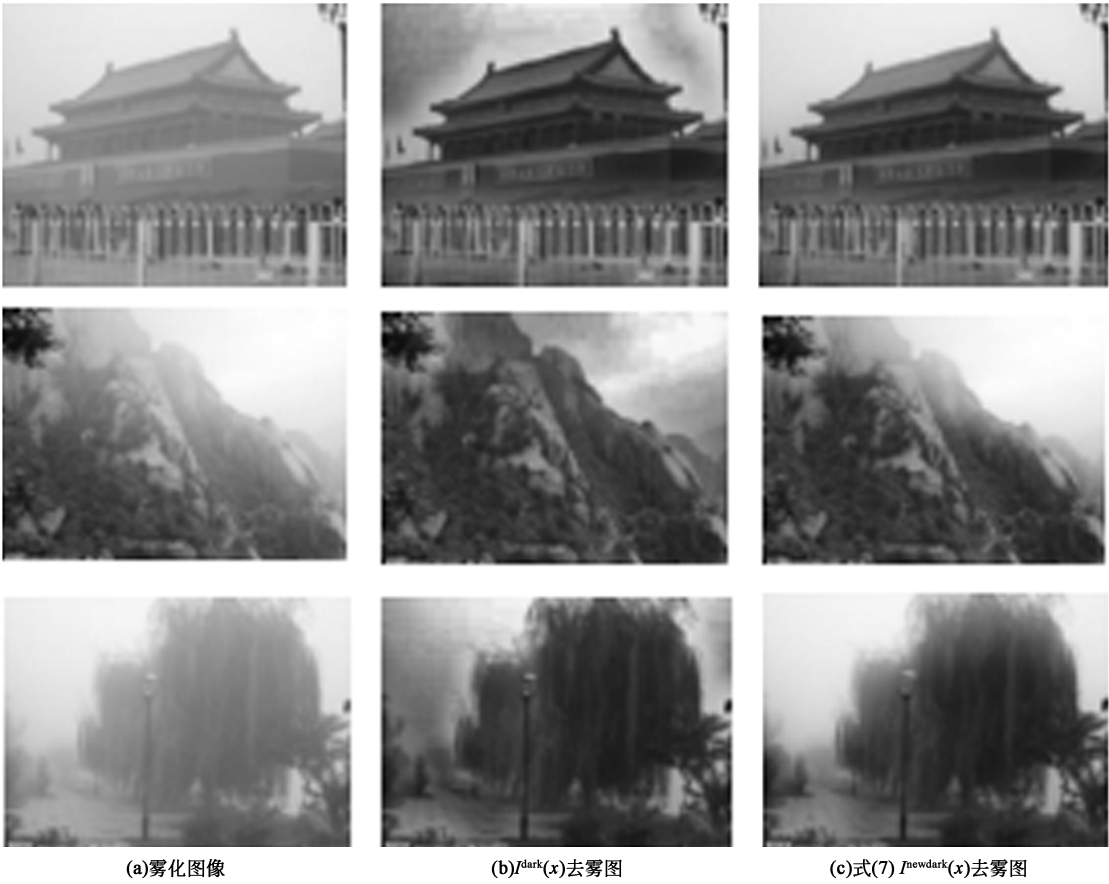


图 2 式(7) $I^{\text{newdark}}(x)$ 去雾测试结果
Fig.2 Haze removal test results of Formula (7)

$$I^{\text{newdark}}(x) = \begin{cases} \rho(x) \times I^{\text{dark}}(x) + (1 - \rho(x)) \times I^{\text{idark}}(x) & \text{if } I^{\text{dark}}(x) > I^{\text{idark}}(x) \text{ and } \rho(x) < \rho_T \\ I^{\text{dark}}(x) & \text{else} \end{cases}, \tag{8}$$

其中:

$$\rho(x) = \frac{2 \times I^{\text{dark}}(x) \times I^{\text{idark}}(x)}{[I^{\text{dark}}(x)]^2 + [I^{\text{idark}}(x)]^2}, \tag{9}$$

式中 $\rho(x)$ 为 $I^{\text{dark}}(x)$ 与 $I^{\text{idark}}(x)$ 的相关系数, ρ_T 为阈值。式(8)的融合规则是根据暗原色和逆暗原色值的大小实现的,对于非明亮区域一般 $I^{\text{dark}}(x) \leq I^{\text{idark}}(x)$ 或 $I^{\text{dark}}(x) > I^{\text{idark}}(x)$ 但相关系数 $\rho(x)$ 值较大($\rho(x) \geq \rho_T$),此时暗原色保持不变;而对于明亮区域一般 $I^{\text{dark}}(x) > I^{\text{idark}}(x)$ 且相关系数 $\rho(x)$ 值较小($\rho(x) < \rho_T$),此时将二者进行线性融合, $\rho(x)$ 值越小,表明图像越逼近明亮区域,融合后的暗原色 $I^{\text{newdark}}(x)$ 中 $I^{\text{dark}}(x)$ 所占比重越小, $I^{\text{idark}}(x)$ 所占比重越大,反之亦然。采用式(8)融合方法修正暗原色,仅与 $I^{\text{dark}}(x)$ 和 $I^{\text{idark}}(x)$ 有关,与图像其它参数无关,并且无需精确划分明亮区与非明亮区,不仅去雾及消除色彩失真效果好,计算量小,而且对各种类型含明亮区域雾化图像都适应,普适性

好,这是本文方法的特点。

图 1(f) 为 $\rho_T=0.5$ 时融合后的暗原色 $I^{\text{newdark}}(x)$ 图,图中非天空区部分基本与 $I^{\text{dark}}(x)$ 相同,天空区部分基本与 $I^{\text{idark}}(x)$ 相同。图 1(g) 为采用 $I^{\text{newdark}}(x)$ 去雾后的图像,天空区无色彩失真,非天空区去雾能力强,整幅图像的去雾效果非常好。

ρ_T 的大小对本文方法的效果有影响,大量实验发现,对于大多数自然图像 ρ_T 取 0.5 时可获得较好的效果。图 3 所示为 ρ_T 取不同值时的实验结果, ρ_T 取 0.5 时效果非常好,见图 3(c); ρ_T 取值过小, $I^{\text{newdark}}(x)$ 中 $I^{\text{dark}}(x)$ 所占比重加大,可增加算法的去雾能力,但天空区易发生色彩失真,见图 3(b)。由式(8)可知若 $\rho_T=0$ 则 $I^{\text{newdark}}(x) = I^{\text{dark}}(x)$,对暗原色无修正,本文方法退化为经典暗原色先验方法; ρ_T 取值过大,有利于消除天空区色彩失真,但使算法去雾能力下降,见图 3(d)。因此在实际应用中可根据需要调节 ρ_T 值。

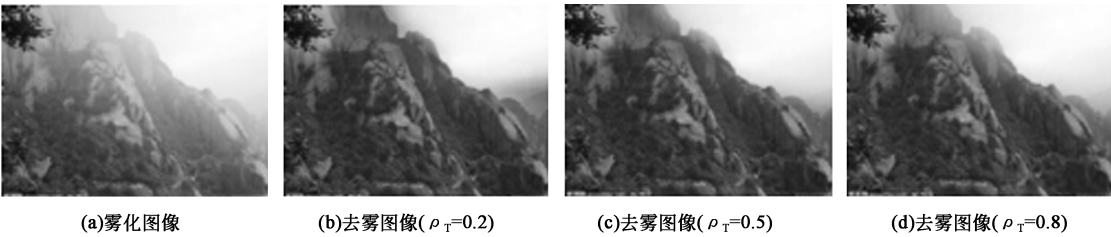


图 3 不同 ρ_T 值的去雾效果比较
Fig.3 Comparison of haze removal effect of different ρ_T value

4 实验结果与分析

本文的对比实验主要针对目前流行的文献[9]容差机制方法进行。文献[9]方法主要原理是

引进一个参数 k , 定义为容差, 对于 $|I(x) - A| \leq k$ 的区域, 认为是明亮区域, 需对透射率进行修正; $|I(x) - A| > k$ 的区域, 认为是满足暗原色先验的区域, 保持原来的透射率不变。透射率修正公式为:

$$t'(x) = \min\left(\max\left(\frac{k}{|I(x) - A|}, 1\right) \times \max(t(x), t_0), 1\right), \tag{10}$$

本文实验硬件环境为:AMD Athlon(tm) 64×2 Dual core Processor 5200+2.7 GHz,1.75 GB 内存;软件环境为:Windows XP Sp2 + Matlab R2009b。实验所用图像来源于网络。在实验中,限定的局部块状区域 Ω 均取为 15×15 大小,使用滑动窗口的方式求取暗原色。本文方法与文献[9]方法的透射率细化统一采用相同参数的引导滤波器,文献[9]方法的容差 k 取值为50(对于归一化图像取 $50/255$),本文方法的阈值 ρ_T 取0.5。

为了客观评价去雾后恢复图像的质量,本文采用文献[16]介绍的评价指标。文献[16]针对去雾图像中出现的 Halo 效应,色调偏移等问题,从有效细节强度(I_{valid})、色调还原程度(d_{correl})、结构信息(S)三个方面对去雾算法进行客观评价,使用 Canny 算子和亮通道检测图像的有效细节强

度;使用直方图相似性检测图像的色调还原程度;使用结构相似性检测图像的结构失真程度。有关 I_{valid} 、 d_{correl} 、 S 的详细定义见文献[16],其综合测评指标 Q 为:

$$Q=(I_{\text{valid}})^{\alpha}\times(d_{\text{correl}})^{\beta}\times(S)^{\gamma},\quad(11)$$

为了简单起见取 $\alpha=\beta=\gamma=1$ 。 I_{valid} 值越大表明去雾能力越强; d_{correl} 及 S 值越大表明去雾图像的失真越小,其中 d_{correl} 值越大表明消除色彩失真能力越强; Q 值越大表明去雾图像的整体质量越高。本文选择5幅不同尺寸和不同景物的含天空区雾化图像进行实验及对比分析,如图4~图8所示,包括雾化图像、二种方法的去雾图像及透射率分布图。表1所示为实验结果的客观评价指标数据。

在主观视觉方面,由图4(b)~图8(b)可见,文献[9]方法的透射率在大部分天空区提升不够



图 4 去雾效果及透射率分布对比(一)
Fig.4 Comparison of Haze removal effect and transmittance distribution (1)

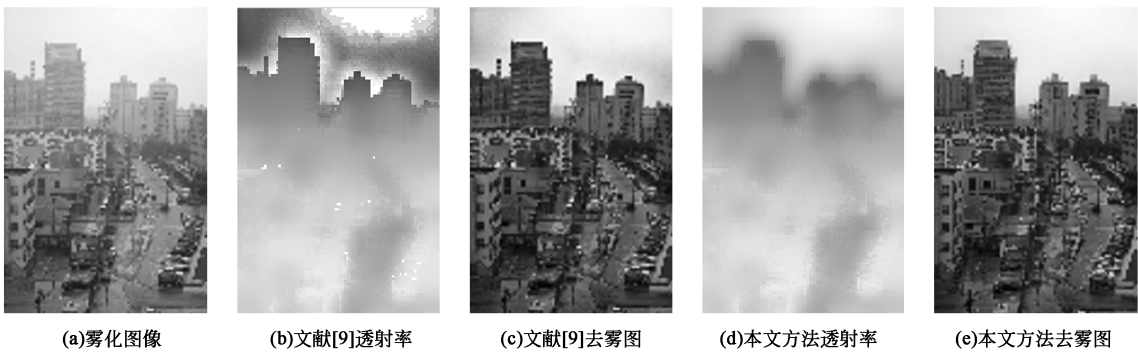


图 5 去雾效果及透射率分布对比(二)
Fig.5 Comparison of Haze removal effect and transmittance distribution (2)



图 6 去雾效果及透射率分布对比(三)
Fig.6 Comparison of Haze removal effect and transmittance distribution (3)



图 7 去雾效果及透射率分布对比(四)

Fig.7 Comparison of Haze removal effect and transmittance distribution (4)



图 8 去雾效果及透射率分布对比(五)

Fig.8 Comparison of Haze removal effect and transmittance distribution (5)

而偏小,亮度较低,呈块状浅黑色,导致相应区域的去雾图像出现色斑,视觉效果变差,见图 4(c)~图 8(c)。由图 4(d)~图 8(d)可见,本文方法获得天空区透射率较大,亮度较高,由图 4(e)~图 8(e)可见天空区中色斑基本被消除,视觉效果明显优于文献[9]方法。

在客观评价方面,由表 1 可知,除图 5、图 8 中结构信息 S 指标以外,本文方法的其它各项客观评价指标都比文献[9]方法有所提高,由表 1 统

计可知本文方法的 I_{valid} 指标平均值比文献[9]方法提高 4.4%, d_{correl} 指标平均值提高 41.1%,S 指标平均值基本相同,Q 指标平均值提高 48.7%。 d_{correl} 指标平均值和 Q 指标平均值有较大幅度的提高,说明本文方法在改善明亮区域色彩失真及提高去雾图像总体质量方面明显优于文献[9]方法,这正好与主观评价的结果保持一致。此外,本文方法与文献[9]方法运算量基本相同,运算耗时也基本相同。

表 1 两种方法去雾效果客观评价
Tab.1 Haze removal effect objectively evaluate of two methods

雾化图像	去雾算法	有效细节强度 (I_{valid})	色调还原程度 (d_{correl})	结构信息(S)	综合测评(Q)
图 4(a)	文献[9]方法	0.342 9	0.151 1	0.913 4	0.047 3
	本文方法	0.352 8	0.155 2	0.919 9	0.050 4
图 5(a)	文献[9]方法	0.488 7	0.107 5	0.670 3	0.035 2
	本文方法	0.492 9	0.263 2	0.669 1	0.086 8
图 6(a)	文献[9]方法	0.519 9	0.342 3	0.932 8	0.166 0
	本文方法	0.545 2	0.418 8	0.950 0	0.216 9
图 7(a)	文献[9]方法	0.485 2	0.199 6	0.920 5	0.089 1
	本文方法	0.500 6	0.312 0	0.922 9	0.144 1
图 8(a)	文献[9]方法	0.375 4	0.392 1	0.966 8	0.142 3
	本文方法	0.417 2	0.533 6	0.966 7	0.215 2

5 总 结

暗原色先验模型对于明亮区域不适应,暗原色估计过大,导致透射率估计过小,出现色彩失真现象。本文通过大量实验发现,以逆暗原色代替暗原色可使图像明亮区域获得比较真实的透射率,消除明亮区域色彩失真现象,但逆暗原色不适应于非明亮区域去雾。本文将暗原色与逆暗原色进行融合处理,构造一种新的暗原色,能适应于整幅图像的去雾处理。本文方法

无需对雾化图像的明亮区与非明亮区进行分割和设置一些经验参数值,对各种类型含明亮区域雾化图像都适应,普适性好。此外,本文方法保持暗原色先验的框架不变,其去雾过程与步骤与暗原色先验方法相同,只是增加了对暗原色的融合修正处理环节,计算量小。实验结果表明,本文方法在消除明亮区域色彩失真和提高整体去雾图像质量方面优于目前流行的容差机制方法。下一步的工作是寻找一种计算最优相关系数阈值 ρ_T 方法,使之成为一种自适应、高效的含明亮区域图像去雾算法。

参 考 文 献:

- [1] 郭璠,蔡自兴,谢斌,等.图像去雾技术研究综述与展望[J].计算机应用,2010,30(9):2417-2421.
GUO F, CAI Z X, XIE B, et al. Review and prospect of image dehazing techniques [J]. *Journal of Computer Applications*, 2010, 30(9): 2417-2421. (in Chinese)
- [2] 李滚,吴劫夫,雷志勇.图像雾霾等级评价及去雾技术研究进展[J].激光杂志,2014,35(9):1-6.
LI G, WU J F, LEI Z Y. Research progress of image haze grade evaluation and dehazing technology [J]. *Laser Journal*, 2014, 35(9): 1-6. (in Chinese)
- [3] HE K M, SUN J, TANG X O. Single image haze removal using dark channel prior [C]. *Proceedings of the 27th IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, CVPR*, Miami: IEEE, 2009: 1956-1963.
- [4] ANCUTIC O, ANCUTIC, HERMANS C, et al. A fast semi-inverse approach to detect and remove the haze from a single image [C]. *Proceedings of the 10th Asian Conference on Computer Vision, Queenstown*, New Zealand: Springer, 2010: 501-514.
- [5] 南栋,毕笃彦,马时平,等.基于景深约束的单幅雾天图像去雾算法[J].电子学报,2015,43(3):500-504.
NAN D, BI D Y, MA S P, et al. Single image dehazing method based on scene depth constraint [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2015, 43(3): 500-504. (in Chinese)
- [6] 李加元,胡庆武,艾明耀,等.结合天空识别和暗通道原理的图像去雾[J].中国图象图形学报,2015,20(4):514-519.
LI J U, HU Q W, AI M Y, et al. Image haze removal based on sky region detection and dark channel prior [J]. *Journal of Image and Graphics*, 2015, 20(4): 514-519. (in Chinese)
- [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.
LEI Q, SHI C J, CHEN T T. Single sea image haze removal method based on segmentation of sky area [J]. *Computer Engineering*, 2015, 41(5): 237-242. (in Chinese)
- [8] WANG G Y, REN G H, JIANG L H, et al. Single image dehazing algorithm based on sky region segmentation [J]. *Information Technology Journal*, 2013, 12(6): 1168-1175.
- [9] 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.
JIANG J G, HOU T F, QI M B. Improved algorithm on image haze removal using dark channel prior [J]. *Journal of Circuits and Systems*, 2011, 16(2): 7-12. (in Chinese)
- [10] 孙小明,孙俊喜,赵立荣,等.暗原色先验单幅图像去雾改进算法[J].中国图象图形学报,2014,19(3):381-385.
SUN X M, SUN J X, ZHAO L R, et al. Improved algorithm for single image haze removing using dark channel prior [J]. *Journal of Image and Graphics*, 2014, 19(3): 381-385. (in Chinese)
- [11] 张登银,鞠铭烨,王雪梅.一种基于暗通道先验的快速图像去雾算法[J].电子学报,2015,43(7):1437-1443.
ZHANG D Y, JU M Y, WANG X M. A fast image haze removal algorithm using dark channel prior [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2015, 43(7): 1437-1443. (in Chinese)
- [12] NARASIMHAN S G, NAYAR S K. Contrast restoration of weather degraded images [J]. *IEEE Transactions on*

Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2003, 25(6): 713-724.

- [13] 高银,云利军,石俊生,等.基于各向异性高斯滤波的暗原色理论雾天彩色图像增强算法[J].计算机辅助设计与图形学学报,2015,27(9):1701-1706.
GAO Y, YUN L J, SHI J S, *et al.* Enhancement dark channel algorithm of color fog image based on the anisotropic Gaussian filtering [J]. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 2015, 27(9): 1701-1706. (in Chinese)
- [14] 王卫星,肖翔,陈良琴.结合最小滤波和引导滤波的暗原色去雾[J].光学精密工程,2015,23(7):2100-2108.
WANG W X, XIAO X, CHEN L Q. Image dark channel prior haze removal based on minimum filtering and guided filtering [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23(7): 2100-2108. (in Chinese)
- [15] 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.
- [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 D P, YU J, XIAO C B. No-reference quality assessment method for defogged images [J]. *Journal of Image and Graphics*, 2011, 16(9): 1753-1757. (in Chinese)

作者简介:龚昌来(1962—),男,湖南浏阳人,教授,主要从事图像与信号处理方面的研究。E-mail: dzxgcl@sohu.com