

基于改进容差机制的图像去雾算法

杨 斌,林志贤,郭太良

(福州大学 物理与信息工程学院,福州 350100)

摘 要:传统容差机制图像去雾算法中的容差参数选取受图像是否含天空区域影响,且修正后的透射率容易出现分层现象。为此,提出一种基于颜色衰减先验的容差机制透射率纠正算法。通过判断图像每一像素点的亮度-饱和度差值与原始透射率的比值大小提取天空等明亮区域,根据原始透射率值以及亮度-饱和度差值对该区域透射率进行放大修正,使其趋近于真实值。实验结果表明,在不改变容差参数的情况下,相对基于暗原色先验的图像去雾算法,该算法色调还原度值、峰值信噪比值均有所提升,复原图像质量更好。

关键词:容差机制;颜色衰减先验;暗原色先验;去雾;颜色失真;天空区域

中文引用格式:杨斌,林志贤,郭太良. 基于改进容差机制的图像去雾算法[J]. 计算机工程,2019,45(1):226-232.

英文引用格式:YANG Bin, LIN Zhixian, GUO Tailiang. Image haze removal algorithm based on improved tolerance mechanism[J]. Computer Engineering, 2019, 45(1):226-232.

Image Haze Removal Algorithm Based on Improved Tolerance Mechanism

YANG Bin, LIN Zhixian, GUO Tailiang

(College of Physics and Information Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350100, China)

[Abstract] The selection of tolerance parameters in traditional tolerance mechanism image haze removal algorithm is affected by whether the image contains sky area or not, and the modified transmittance is prone to stratification. To solve this problem, a correction algorithm of tolerance mechanism based on color attenuation prior is proposed. By judging the ratio of the brightness-saturation difference to the original transmittance of each pixel in the image, bright areas such as the sky are extracted, and then the transmittance of the area is magnified and corrected according to the original transmittance value and the brightness-saturation difference to make it approach the true value. Experimental results show that, without changing the tolerance parameters, compared with the image haze removal algorithm based on dark channel prior, the tonal reductivity and Peak Signal to Noise Ratio (PSNR) of the proposed algorithm are improved, and the quality of the restored image is better.

[Key words] tolerance mechanism; color attenuation prior; dark channel prior; haze removal; color distortion; sky area
DOI:10.19678/j.issn.1000-3428.0049513

0 概述

在有雾的天气情况下,视觉系统获取的图像会受到大气散射介质对可见光散射作用的影响,出现对比度小、色彩失真、细节模糊、可视性降低等图像退化现象^[1],从而影响视觉系统的正常工作。为解决该问题,需要对雾天图像进行复原。目前,图像去雾算法主要分为基于模型去雾和基于非模型去雾2种^[2-3]。其中,基于非模型去雾以 Retinex 算法为代表^[4],该类算法的本质是增强图像对比度,但可能会损失图像信息,导致图像失真。基于模型的去雾

算法本质是构建雾天图像的物理模型,然后反推雾天图像退化过程以复原清晰图像,这类算法复原的图像色彩自然真实,不易出现图像信息丢失^[5-6]现象。

近年来,图像去雾算法得到广泛研究并取得较多成果。文献[7]使用暗原色先验规律实现去雾算法,由于在多数情况下得到的复原图像颜色自然真实、清晰度较高,使该算法得到广泛关注,但是其有一些暗原色先验规律失效的区域,比如天空等明亮区域,会发生严重的色调偏移现象。针对该问题,文献[8]引入一种容差机制对天空等明亮区域进行判

基金项目:国家重点研发计划(2016YFB0401503);福建省科技重大专项(2014HZ0003-1);广东省科技重大专项(2016B090906001);福建省属高校专项课题(JK2014002)。

作者简介:杨 斌(1992—),男,硕士研究生,主研方向为图像处理技术、嵌入式系统;林志贤(通信作者),教授、博士、博士生导师;郭太良,研究员、博士生导师。

收稿日期:2017-11-30 **修回日期:**2018-01-22 **E-mail:**lzx2005000@163.com

断,并提升该区域的透射率,从而解决了天空区域颜色失真的问题。但是,该算法容差参数的选取较复杂,且其修正后透射率会表现出提升力度不足或过度补偿等问题。为此,文献[9]构建包括对比度和信息丢失的成本函数,通过求解成本函数最小值来获得每个区域块的最佳传输率值,再结合雾天降质物理模型复原图像。该算法很好地解决了天空区域的偏色问题,且信息损失较小。文献[10]基于有雾图像像素的亮度和饱和度随雾的浓度变化而急剧变化的先验知识,通过构建一种线性模型求得图像景深信息,从而实现图像去雾。但是该算法涉及的参数较多,自适应性较差。文献[11]根据天空区域的特征,设定梯度和亮度阈值对天空区域进行识别提取,以调整天空区域的透射率。该算法使用最大连通区域作为识别的天空,比较耗时,同时容易遗漏部分天空区域,导致遗漏区域色彩失真。

针对文献[8]算法存在的问题,本文提出一种基于颜色衰减先验的容差机制透射率纠正算法。根据图像亮度-饱和度的差值与透射率大小的比值来判断天空等明亮区域,对该区域进行透射率放大调整,以获得图像去雾效果。

1 基于暗原色先验的图像去雾算法

在雾天情况下,图像的退化过程可以用大气散射模型^[12]描述,即:

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

其中, x 为空间坐标, $I(x)$ 为有雾图像, A 为全局大气光值, $J(x)$ 为复原后的清晰无雾图像, $t(x)$ 为透射率。

暗原色先验^[7]是基于对大量无雾图像观察所得的一个统计规律,即在无雾清晰图像中,绝大部分非天空区域中至少有一个颜色通道的亮度值很低并趋近于0。换言之,对于图像 J ,有:

$$J^{\text{dark}} = \min_{y \in \Omega(x)} \min_{c \in \{r, g, b\}} (J^c(y)) \rightarrow 0 \quad (2)$$

其中, c 表示图像 J 的一个颜色通道, $\{r, g, b\}$ 分别表示红、绿、蓝3个颜色通道, $\Omega(x)$ 表示以 x 为中心的方形区域, J^{dark} 表示图像 J 的暗原色。

假定大气光值 A 已知,局部区域内透射率为固定常数,记为 $\tilde{t}(x)$ 。在局部区域内对式(1)两侧同除以 A 并做如式(2)所示的暗原色求值计算。

$$\tilde{t}(x) = 1 - \omega \min_{c \in \{r, g, b\}} \left(\min_{y \in \Omega(x)} \frac{I^c(y)}{A^c} \right) \quad (3)$$

引入系数 ω ($0 < \omega \leq 1$, 通常取0.90~0.97)是为了保持复原图像的视觉朦胧感与真实感。

大气光值 A 的求取方法为:选取暗原色图中亮度前0.1%的像素位置所对应原图的像素,将这些像素亮度的最大值作为大气光值 A 。

根据式(3)求得的透射率与大气光值 A 恢复出无雾图像 $J(x)$,即:

$$J(x) = \frac{I(x) - A}{t(x)} + A \quad (4)$$

对于多数不含天空等明亮区域的户外雾天降质图像,暗原色先验去雾算法能够取得很好的复原效果。但是,对含有天空等明亮区域的雾天降质图像,由于该算法没有考虑到暗原色先验在天空等明亮区域会失效的情况,导致其复原图像在该区域透射率预估偏小,从而出现图像颜色失真的问题。因此,要对该区域的透射率进行调整。

2 基于容差机制的透射率调整算法

针对文献[7]算法存在的问题,文献[8]引入一个容差参数 K ,规定 $|I(x) - A| < K$ 的区域为需要放大透射率的明亮区域, $|I(x) - A| > K$ 的区域为暗原色先验有效区域,该区域透射率保持不变。为此,重新定义透射率为:

$$t'(x) = \min(\max(\frac{K}{|I(x) - A|}, 1) \times \max(t(x), t_0), 1) \quad (5)$$

其中, t_0 为透射率下限,取值为0.1。该操作既保持了暗原色先验生效区域的去雾能力,同时又能提升天空等明亮区域的透射率,可以缓解颜色失真问题。但是这种算法存在以下2个问题:

1) 算法对透射率调整方式的本质是幂函数调整,如图1所示,可知当 $|I(x) - A|$ 在 K 值附近(即明暗区域交界处)时,透射率的放大倍数较小,提升力度较弱。当 $|I(x) - A|$ 较小时,透射率的放大倍数剧烈增大,提升力度偏大,最终导致图像明暗区域交界处的透射率依旧偏小,而 $|I(x) - A|$ 较小区域的透射率多数为1甚至大于1,导致过度补偿问题。

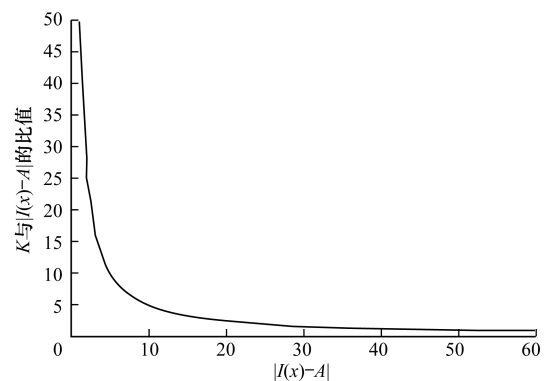


图1 透射率提升曲线($K=50$)

2) 算法的容差参数 K 需要随图像类型的变化而变化。对于有天空区域的图像,要选取较大的容差值 K_1 ,对于无天空区域的图像,要选取较小的容差值 K_2 。若 K_2 的取值较大(如等于 K_1),则会导致大部分非天空区域被误检为透射率调整区域。因此,该算法鲁棒性较差。

3 基于颜色衰减先验的容差机制透射率纠正

颜色衰减先验^[10]内容为有雾图像像素的亮度和饱和度随雾的浓度变化而急剧变化,即:

$$d(x) \propto c(x) \propto vs(x) \quad (6)$$

其中, $d(x)$ 为景深, $c(x)$ 为雾的浓度值, $vs(x)$ 为像素亮度与饱和度的差值。从式(6)可以看出, $vs(x)$ 的值与景深成正比。

同时有:

$$t(x) = e^{-\beta d(x)} \quad (7)$$

又由于天空处的景深 $d(x)$ 最大,因此天空等明亮区域存在以下 2 个特性:

- 1) 图像像素亮度与饱和度的差值 $|vs(x)|$ 最大。
- 2) 透射率 $|t(x)|$ 最小。

由此可知,天空等明亮区域的透射率与亮度-饱和度差值的比值 $|t(x)/vs(x)|$ 最小。基于此,本文引入新的容差值 T ,将 $|t(x)/vs(x)| < T$ 的区域定义为暗原色先验失效的区域,将 $|t(x)/vs(x)| \geq T$ 的区域定义为透射率无需调整的非明亮区域。本文重新定义透射率如下(取 $T=0.5$):

$$t'(x) = \begin{cases} \max(1 - vs(x) \times t(x), t(x)), & |t(x)/vs(x)| < T \\ t(x), & |t(x)/vs(x)| \geq T \end{cases} \quad (8)$$

文献[8]将 $|I(x) - A| < K$ 的区域定义为需要放大透射率的明亮区域,其本质是将降质图片中像素值接近大气光值 A 的点视为天空等明亮区域。但是由于在不含天空区域的降质图片中,作为大气光值 A 的像素点本身就是非天空区域的像素点,因此图像的 $|I(x) - A|$ 值较小,此时若将 K 值仍然取为

有天空区域图像时的值,就会导致有部分非明亮区域被误检为明亮区域。而本文算法将 $|t(x)/vs(x)| < T$ 的区域定义为暗原色先验失效的明亮区域,在存在天空区域的图片中,由于天空区域透射率小且像素亮度-饱和度差值较大,导致该区域能较好地被识别出。而对于不含天空区域的图片,由于透射率较小且像素亮度-饱和度差值较大的区域较少,这样就能够避免因大部分透射率调整区域误识别而导致算法去雾能力削弱的问题。

此外,本文算法透射率调整的本质是线性函数调整方式,其放大倍数变化平缓。又由于 $1 - vs(x) \times t(x)$ 恒小于等于 1,因此该算法可以使得调整后的透射率趋近于 1 而不大于 1,从而避免出现透射率提升倍数偏小或透射率过度补偿的问题。

图 2 所示为本文算法与文献[8]算法对明亮区域的识别结果比较。图 2(b)中的黑色区域为保持容差值不变时($K_1 = K_2 = 50$),文献[8]算法对含天空区域图片和不含天空区域图片的透射率调整区域,从中可以看出,文献[8]算法对于有天空区域的图片识别效果较好,但是对于无天空区域的图片,其出现较大的误识别问题。图 2(c)中的黑色区域为保持 T 不变时($T=0.5$),本文算法对含天空区域图片和不含天空区域图片的透射率调整区域,从中可以看出,相比于图 2(b),本文算法在含天空区域图片的处理上保持了传统算法的效果,对于无天空区域的图片,本文算法大幅降低了误识别率,即本文算法能够保持较好的适应性。图 3 所示为 3 种算法的透射率结果比较。其中,图 3(b)为文献[7]算法调整后的透射率,可以明显看出其天空区域全黑,透射率趋近于 0,远小于真实值。图 3(c)为文献[8]算法调整后的透射率,从中可以看出明显的分层现象,明暗交界处透射率仍然较小,且上方有明显的过度补偿现象。图 3(d)为本文算法调整后的透射率,从中可以看出,本文算法明亮区域透射率变化平缓,不存在提升力度不足和过度补偿的现象。



(a)原图



(b)文献[8]算法透射率调整区域($K=50$)



(c)本文算法透射率调整区域($T=0.5$)

图 2 2 种算法明亮区域识别结果

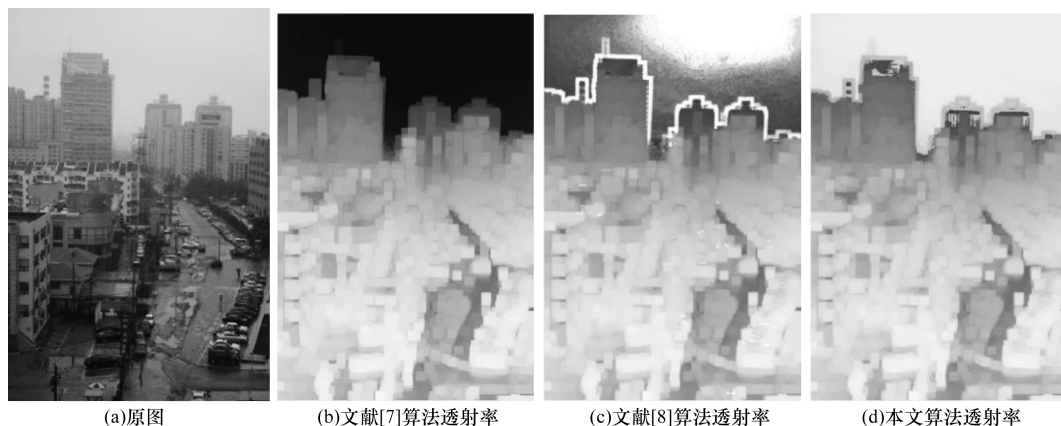


图 3 3 种算法调整后的透射率结果

4 实验结果与分析

本次实验参数均按典型值设置如下:滤波窗口大小为 7×7 , $\omega = 0.95$,透射率下限值 $t_0 = 0.1$ 。各算法均采用引导滤波算法^[13]细化原始的粗略透射率。引导滤波的滤波器窗口 r 为 40,调节系数 ε 取 0.001。有雾图像素材均来自互联网,实验运行环境

主要配置参数为:Inter(R) Core(TM) i7-7700HQ 2.81 GHz CPU,8 GB RAM。

4.1 主观评价

为验证本文算法的复原效果,在参数固定的前提下分别对含有天空区域以及不含天空区域的图片进行去雾测试,并与文献[7-8]算法进行对比,结果如图4、图5所示。



图 4 3 种算法针对含天空区域图片的去雾结果比较

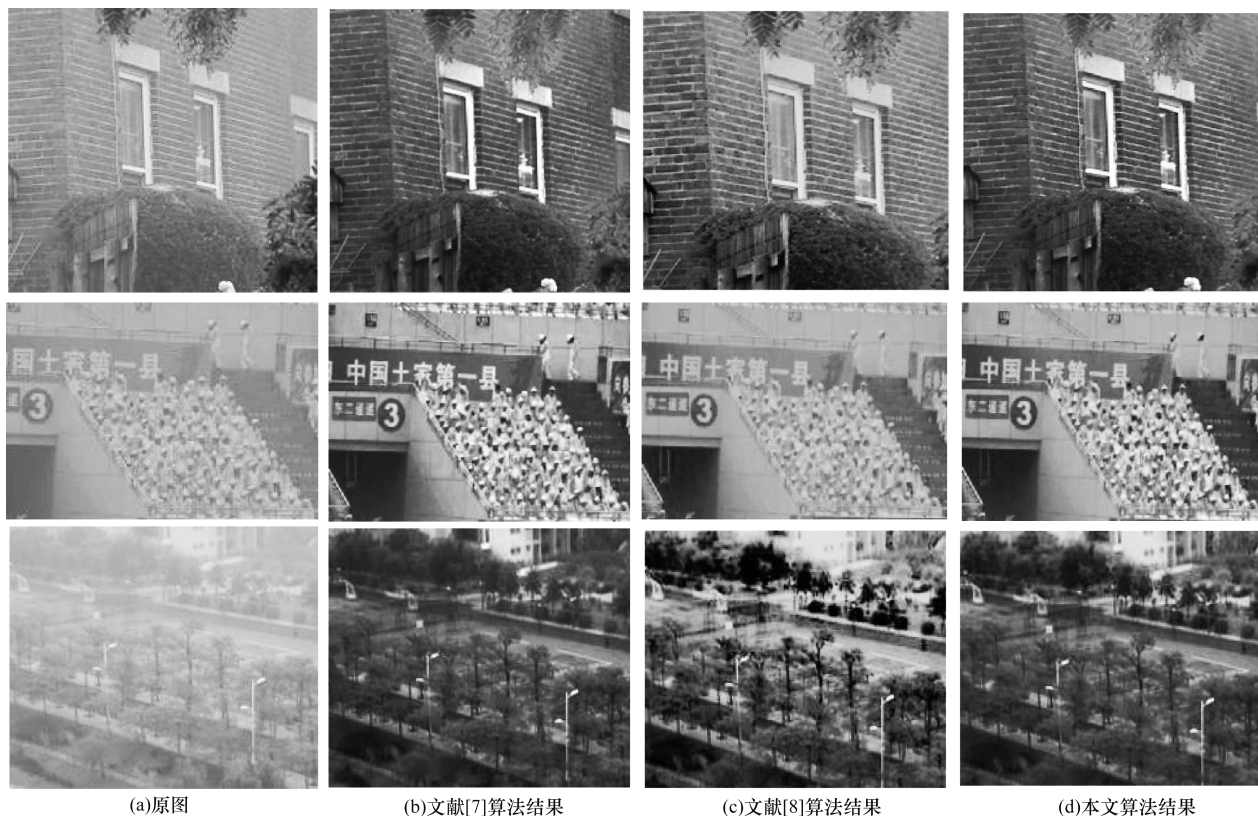


图 5 3 种算法针对不含天空区域图片的去雾结果比较

从图 4(b)可以看出,暗原色先验结合引导滤波算法在非明亮区域能取得较好的去雾效果,但是在天空等明亮区域会产生严重的颜色失真现象。从图 4(c)可以看出,文献[8]算法较好地改善了图像明亮区域的色彩失真问题,但是图像明暗区域交界处以及天空边缘处仍然存在一定程度的偏色现象。从图 4(d)可以看出,本文算法能够解决复原图像在明亮区域的色彩失真问题,并且图像明暗区域过渡自然,视觉效果最好。

从图 5 可以看出,对于不含天空区域的图片,文献[7]算法的去雾效果最好。对比文献[8]算法和本文算法,在容差值不变的情况下,前者去雾不彻底,且某些区域会出现严重的色彩失真现象。而本文算法处理后的图像清晰度较高,去雾效果与文献[7]算法比较接近。

4.2 客观评价

标准差是评判一幅图像复原效果的重要标准,其反映一幅图像对比度的大小,图像标准差越大,说明复原图像对比度越高,图像越清晰细致,色彩越明亮丰富。标准差的计算公式为:

$$std = \sqrt{\frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (I(i,j) - I_{\text{mean}})^2} \quad (9)$$

其中, I_{mean} 为图像像素的均值,计算如式(10)所示。

$$I_{\text{mean}} = \frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N I(i,j) \quad (10)$$

色调还原度^[15]的计算公式为:

$$d_{\text{correl}}(h', h) = \frac{\sum_k (h'_k - \tilde{h}') (h_k - \tilde{h})}{\sqrt{\sum_k (h'_k - \tilde{h}')^2 \sum_k (h_k - \tilde{h})^2}} \quad (11)$$

其中, h_k 、 h'_k 分别为去雾前后的直方图, $\tilde{h}$ 、 $\tilde{h}'$ 分别是 h_k 、 h'_k 的平均值。本文取去雾前后图像 RGB 三通道的色调还原度平均值作为最终图像的色调还原度。色调还原度越大,说明复原图像越真实自然。

峰值信噪比(Peak Signal to Noise Ratio, PSNR)在一定程度上能反映图像的失真程度,PSNR 值越大,说明复原图像失真程度越轻。MSSIM^[15]指结构相似性的平均值,其可以较好地反映人眼的主观感受。MSSIM 值越大,说明图像质量越好。

为客观评价复原图像的质量,本文采用上述指标来评测文献[7-8]算法与本文算法的去雾性能,结果如表 1、表 2 所示。从表 1 可以看出,针对含有天空区域的图片,本文算法的 PSNR 指标平均值相比于文献[7]算法、文献[8]算法分别提升 23.446 0%、

8.923 6%,色调还原度的平均值分别提升 310.355 0%、9.316 3%,标准差的平均值分别提升 26.400 0%、5.681 5%,MSSIM 的平均值分别提升 12.134 0%、4.089 0%。这表明在含有天空区域图片中,本文算法在改善色彩失真、保持结构相似性等方面相比文献[8]算法有一定程度的提升。同时,相比于文献[7]算法,本文算法色调还原度提升非常明显,说明本文算法能够解决文献[7]算法复原图像色彩失真的问题。此外,在 PSNR、标准差以及 MSSIM 指标上也有较大提升,说明本文算法复原图像失真程度较小,图像质量较好。从表 2 可以看出,针对不含天

空区域的图片,本文算法的 PSNR 指标平均值相比于文献[7]算法、文献[8]算法分别提升 -3.73%、31.46%,色调还原度的平均值分别提升 0.706%、75.340%,标准差的平均值分别提升 -1.120%、19.832%,MSSIM 的平均值分别提升 -1.69%、35.81%。这表明在不改变容差参数的情况下处理不含天空区域图片时,本文算法在改善色彩失真、保持结构相似性等方面远远优于文献[8]算法。同时,本文算法各方面指标与文献[7]算法相近,说明本文算法能够保持文献[7]算法适用于不含天空区域图片的特性,其对该类图片的去雾效果较好。

表 1 3 种算法针对含天空区域图片的去雾性能比较

雾化图像	去雾算法	PSNR 均值	色调还原度均值	标准差均值	MSSIM 均值	运行时间/ms
图 4(a)城市群 (图像大小为 500 × 380)	原图	—	—	51.793 4	—	—
	文献[7]算法	19.718 3	0.217 20	51.481 4	0.839 7	384
	文献[8]算法	22.670 2	0.695 20	58.573 5	0.894 3	390
	本文算法	25.265 9	0.697 50	59.994 6	0.929 2	395
图 4(a)塔山 (图像大小为 480 × 360)	原图	—	—	43.527 5	—	—
	文献[7]算法	18.082 3	0.083 10	61.025 3	0.747 2	304
	文献[8]算法	19.879 2	0.605 90	69.580 4	0.817 1	311
	本文算法	20.306 5	0.660 40	70.537 3	0.832 7	313
图 4(a)居民楼 (图像大小为 600 × 450)	原图	—	—	57.493 7	—	—
	文献[7]算法	21.477 7	0.259 10	56.407 0	0.836 5	483
	文献[8]算法	23.116 3	0.600 47	66.391 7	0.851 5	496
	本文算法	23.336 2	0.600 57	66.533 7	0.860 2	495
图 4(a)大山 (图像大小为 800 × 600)	原图	—	—	86.501 5	—	—
	文献[7]算法	15.229 3	0.026 50	63.955 2	0.700 1	1 241
	文献[8]算法	18.775 4	0.297 80	84.116 2	0.802 0	1 251
	本文算法	23.067 7	0.445 80	97.428 3	0.880 4	1 253

表 2 3 种算法针对不含天空区域图片的去雾性能比较

雾化图像	去雾算法	PSNR 均值	色调还原度均值	标准差均值	MSSIM 均值	运行时间/ms
图 5(a)院子 (图像大小为 361 × 240)	原图	—	—	41.229 9	—	—
	文献[7]算法	28.735 9	0.644 20	59.369 5	0.897 5	203
	文献[8]算法	20.382 8	0.401 60	46.894 2	0.600 6	211
	本文算法	27.227 6	0.689 80	58.972 7	0.887 0	214
图 5(a)观众 (图像大小为 426 × 320)	原图	—	—	32.406 0	—	—
	文献[7]算法	27.253 8	0.505 40	61.209 6	0.782 8	346
	文献[8]算法	20.235 8	0.361 70	51.933 2	0.597 9	357
	本文算法	26.760 4	0.494 00	60.822 4	0.759 3	359
图 5(a)校园 (图像大小为 820 × 540)	原图	—	—	42.679 9	—	—
	文献[7]算法	19.915 0	0.168 55	57.901 0	0.767 6	1 217
	文献[8]算法	14.965 7	-0.006 25	48.445 7	0.573 4	1 227
	本文算法	19.084 7	0.143 66	56.681 9	0.760 2	1 229

4.3 时间复杂度分析

对于一幅大小为 $M \times N$ 的图像,本文算法、文献[7-8]算法的运算量都来自透射率细化部分的引导滤波,其时间复杂度为 $O(M \times N)$ 。此外,为避免文献[7]算法在天空区域出现的颜色失真问题,本文算法、文献[8]算法在文献[7]算法的框架上增加了透射率动态调整部分,该部分为简单的四则运算操作。因此,本文算法、文献[7-8]算法最终的时间复杂度均为 $O(M \times N)$ 。从表1、表2可以看出,在同等参数条件下,本文算法运行时间约等于文献[8]算法,同时略大于文献[7]算法。

5 结束语

本文提出一种改进的基于颜色衰减先验的容差机制透射率纠正算法。通过判断图像像素亮度-饱和度差值与原始透射率比值的大小来提取天空等明亮区域,然后放大修正该区域透射率使其趋近于真实值。实验结果表明,本文算法在不改变容差参数 T 的情况下,适用于各类含天空区域和不含天空区域的图像识别,鲁棒性较强,且其复原图像质量优于传统容差机制算法。下一步将在本文算法的基础上对浓雾图像进行更深层次的清晰化处理。

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.
- [2] 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.
- [3] 禹晶,徐东彬,廖庆敏. 图像去雾技术研究进展[J]. 中国图象图形学报,2011,16(9):1561-1576.
- [4] WANG W X, XU L. Retinex algorithm on changing scales for haze removal with depth map[J]. International Journal of Hybrid Information Technology,2014,7(4):353-364.
- [5] 张冰冰,戴声奎,孙万源. 基于暗原色先验模型的快速去雾算法[J]. 中国图象图形学报,2013,18(2):184-188.
- [6] 陈俊君,徐冰. 雾霾天气条件下的机器视觉图像清晰化研究[J]. 计算机工程,2017,43(2):280-285.
- [7] HE K M, SUN J, TANG X O. Single image haze removal using dark channel prior[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2011, 33(12):2341-2353.
- [8] 蒋建国,侯天峰,齐美彬,等. 改进的基于暗原色先验的图像去雾[J]. 电路与系统学报,2011,16(2):155-160.
- [9] KIM J H, JANG W D, SIM J Y, 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.
- [10] ZHU Q, MAI J, SHAO L. A fast single image haze removal algorithm using color attenuation prior[J]. IEEE Transactions on Image Processing,2015,24(11):3522-3533.
- [11] 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.
- [12] 冯骢,达飞鹏,陈璋雯. 一种改进的基于暗原色理论的去雾方法[J]. 东南大学学报(自然科学版),2012,42(S1):70-73.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] WANG Z, BOVIK A C, SHEIKH H R, et al. Image quality assessment: from error visibility to structural similarity[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2004,13(4):600-612.
- [16] ALPERT S, GALUN M, BRANDT A, et al. Image segmentation by probabilistic bottom-up aggregation and cue integration[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2012, 34(2):315-327.
- [17] YAN Q, XU L, SHI J, et al. Hierarchical saliency detection[C]//Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Washington D. C., USA: IEEE Press,2013:1155-1162.
- [18] RAHTU E, KANNALA J, SALO M, et al. Segmenting salient objects from images and videos[C]//Proceedings of European Conference on Computer Vision. Berlin, Germany: Springer,2010:366-379.
- [19] YANG C, ZHANG L, LU H. Graph-regularized saliency detection with convex-hull-based center prior[J]. IEEE Signal Processing Letters,2013,20(7):637-640.

编辑 吴云芳

编辑 吴云芳

(上接第225页)