

基于先验知识与大气散射模型的图像增强算法

鞠铭烨,张登银

(南京邮电大学物联网学院,江苏南京 210003)

摘要: 针对现有图像增强算法大多不具备处理多种类型降质图像的能力,提出一种基于先验知识与大气散射模型的快速图像增强算法. 首先,通过大量实验统计,提出一种新的图像先验—明亮通道先验,即高质量清晰图像中每个像素邻域都极有可能存在白点;随后,对散射模型所存在的缺陷加以改进,并结合明亮通道先验与黑色通道先验,推导出场景反射率的恢复公式;最后,针对黑色通道先验失效情况,提出一种基于可靠性预测的容错机制,以提高其适用范围. 实验结果表明:本文算法不但可以有效的突出纹理细节,还具有一定的色调恢复功能,能够处理多种不同类型的降质图像.

关键词: 图像增强; 明亮通道先验; 黑色通道先验; 大气散射模型

中图分类号: TP391 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2017)05-1218-08

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2017.05.027

Image Enhancement Based on Prior Knowledge and Atmospheric Scattering Model

JU Ming-ye, ZHANG Deng-yin

(School of Internet of Things, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing, Jiangsu 210003, China)

Abstract: Almost the existing image enhancement algorithms are not capable to deal with multi-type degenerated images. In this paper, a fast image enhancement algorithm is proposed based on prior knowledge and atmospheric scattering model. Firstly, an innovative image prior, which were called bright channel prior, were proposed through experimental statistics. It shows that the whites spots are more likely to exist in the neighborhood of each pixels in high-quality clear image. Then, the scattering model were improved and it derived the calculation formula of reflectance image by bright channel prior, dark channel prior and improved scattering model. Finally, we put forward a fault tolerance mechanism, which is based on reliability prediction, to handle the situation that the dark channel prior does not work. The experiment results shows that this algorithm can not only highlight the texture details well but also restore the tone. It is able to deal with multi-type degenerated images.

Key words: image enhancement; bright channel prior; dark channel prior; atmospheric scattering model

1 引言

图像增强是机器视觉领域中最为重要的研究课题之一,利用图像增强技术,可以改善图像的视觉效果,提高人眼对信息的感知能力. 通常,图像降质原因有两点,(1)受到低照度的影响;(2)受到悬浮颗粒的影响. 对于第一类问题,大都是利用对比度拉伸算法进行增强处理,典型的有直方图均衡算法^[1,2]、对数映射算法^[3],此类算法只是单纯提高图像的整体对比度,处理局部对

比度较低的图像时,效果不甚理想. 直至 Retinex 感知理论的出现^[4],才打破这种格局,但基于该理论增强后的图像色调往往趋于灰白. 对于第二类问题,早期成果主要包括基于多幅图像或附加信息的去雾算法^[5-7],这类算法在特定场景下去雾效果较好,但很多情况下,提供额外信息是不切实际的,故此类算法不具实用性. 近年来,单幅图像去雾技术取得了实质性进展,该类算法是在有雾图像中通过先验知识,尽可能准确的估计出相关参数,但现有先验知识均存在自身的局限性,鲁棒性

较弱。如 Tan^[8]通过最大化其局部区域的对比度来计算出每个像素的最佳透射率组合,且利用马尔可夫随机场决策出最优透射率,其本质上仍是对比度拉伸算法,恢复图像的色彩过于饱和;Nishino^[9]利用贝叶斯后验概率模型通过充分挖掘图像中潜在的统计特征进行去雾处理,该方法能够较好的处理浓雾,但处理薄雾时,颜色过于鲜艳;Fattal^[10]假设局部区域内的色度与透射率互不相关,依据颜色的统计特性去雾,因而处理浓雾时效果一般;Tarel^[11]利用中值滤波器估计消散函数,而中值滤波器不具备边缘保持性质,致使恢复图像在深度剧变处仍会残留少量雾气;He^[12]首次提出黑色通道先验的基本概念,利用此先验可取得不错的去雾效果,但由于其抠图处理具有极高的时空复杂度,故该算法不具备实时性。

从本质上讲,上述算法的目的都是为了将原图像的纹理信息进行适当放大,以致于更加适合人眼的感知或机器视觉系统的分析。但现有图像增强算法大多不具备恢复多种类型降质图像的能力,即便具有这种能力,往往也难以获得预期效果。本文在大气散射模型的理论基础上,对其不足之处进行改进,并以黑色通道先验与文中所提明亮通道先验作为附加信息,推导出场景反射率的恢复公式;此外,针对黑色通道先验失效情况,文中也给出了相应的优化机制。实验结果表明本文算法具备处理多种类型降质图像的能力,恢复效果较好。

2 背景

2.1 大气散射模型

在计算机视觉与图形学中,大气散射模型常用来

描述图像受到雾、霾等悬浮颗粒的干扰^[13],其过程可表示为:

$$I(x,y) = A \cdot \rho(x,y) \cdot t(x,y) + A \cdot (1 - t(x,y)) \quad (1)$$

式中, I 与 ρ 分别表示有雾图像与期望得到的场景反射率, A 为天空光照,在单幅图像中一般视为其恒常量, t 为介质透射图,表示反射光穿透介质的能力

$$t(x,y) = e^{-\beta \cdot d(x,y)} \quad (2)$$

其中, β 、 d 分别为消光系数与场景深度图。

2.2 大气散射模型的局限性

He 通过统计得出:在无雾户外图像中,绝大多数像素邻域至少有一个颜色通道的强度值等于或接近于 0,即

$$P_{\text{free-haze}}^{\text{dark}}(x,y) = \min_{c \in \{R,G,B\}} \left(\min_{(x',y') \in \Omega(x,y)} (P_{\text{free-haze}}^c(x',y')) \right) \rightarrow 0 \quad (3)$$

式中, $P_{\text{free-haze}}^c$ 表示无雾图像 $P_{\text{free-haze}}$ 中某个颜色分量, $\Omega(x,y)$ 表示以像素索引 (x,y) 为中心的邻域。利用此先验,式(1)可化简为

$$t(x,y) = 1 - \frac{\min_{c \in \{R,G,B\}} \left(\min_{(x',y') \in \Omega(x,y)} (I^c(x',y')) \right)}{A} \quad (4)$$

式中,天空光照可由腐蚀法估计得出^[12]。将参数 t 、 A 代入式(1)便可恢复出反射率 ρ 。图 1 给出了 He 算法所估计的相关参数及其对应的恢复效果,从图中可看出,虽然远处的薄雾已经被很好的滤除,但树荫处的对比度仍然较低。究其原因,主要是因为散射模型认为图像中所有场景都受到了天空光照的直接辐射,而忽略了辐射不均匀的影响。因此,散射模型中天空光照设置为恒常数具有明显的局限性。

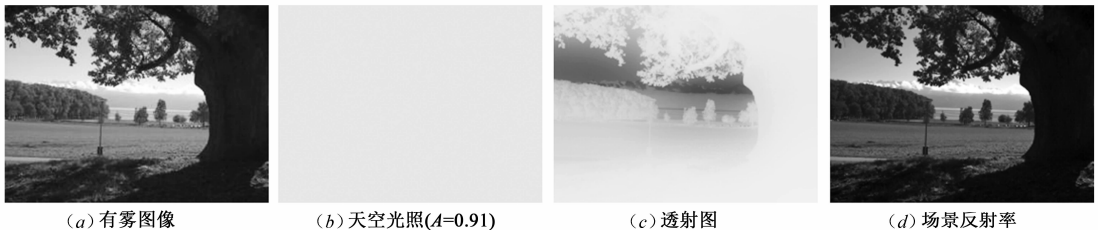


图1 相关估计参数及其去雾效果

3 明亮通道先验

明亮通道先验是一种基于高清图像的客观统计规律:在每个邻域内都极有可能存在某个像素点在某一颜色通道上的数值接近或等于 1。据此,我们定义高清图像 P_{HD} 的明亮通道图为

$$P_{\text{HD}}^{\text{bright}}(x,y) = \max_{c \in \{R,G,B\}} \left(\max_{(x',y') \in \Omega(x,y)} (P_{\text{HD}}^c(x',y')) \right) \rightarrow 1 \quad (5)$$

易知邻域越大,明亮通道先验越可靠;另外,该先验的

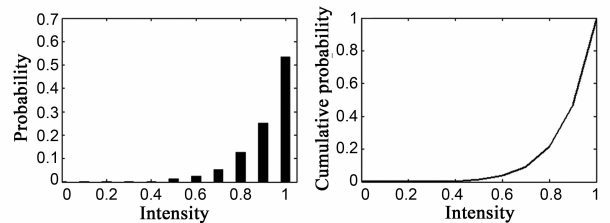


图2 明亮通道先验的统计

成立条件还取决于以下三方面:(a)局部清晰度;(b)颜

色的鲜艳程度,如绿色的叶子、蓝色的海洋;(c)白色目标,如白云、岩石等.

从互联网中随机抽取 8000 张高清图像作为统计对象,并计算出各个高清图像的明亮通道图(邻域设定为 15×15). 统计后的相关数据如图 2 所示,不难看出,大

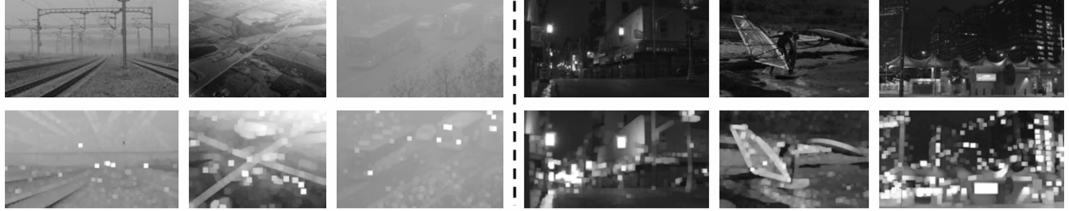


图3 降质图像及其对应的明亮通道图



图4 高清图像及其对应的明亮通道图

4 基于先验知识与大气散射模型的图像增强算法

4.1 场景反射率恢复公式的推导

针对原散射模型所存在的缺陷,本文将对其中天空光照 A 重新定义为环境光照 L ,并认为环境光照是随场景变化而改变的,则式(1)可改写为

$$I(x, y) = L(x, y) \cdot \rho(x, y) \cdot t(x, y) + L(x, y) \cdot (1 - t(x, y)) \quad (6)$$

对式(6)两边分别以尺寸为 r_d, r_b 的方形邻域 Ω_d, Ω_b 进行最小操作与最大操作,且假设邻域内的透射率与环境光照为恒定值,可得

$$\begin{cases} I^{\text{dark}}(x, y) = L(x, y) \cdot \rho^{\text{dark}}(x, y) \cdot t(x, y) + L(x, y) \cdot (1 - t(x, y)) \\ I^{\text{bright}}(x, y) = L(x, y) \cdot \rho^{\text{bright}}(x, y) \cdot t(x, y) + L(x, y) \cdot (1 - t(x, y)) \end{cases} \quad (7)$$

其中

$$\begin{cases} I^{\text{dark}}(x, y) = \min_{c \in \{R, G, B\}} (\min_{(x', y') \in \Omega_d(x, y)} (I^c(x', y'))) \\ \rho^{\text{dark}}(x, y) = \min_{c \in \{R, G, B\}} (\min_{(x', y') \in \Omega_d(x, y)} (\rho^c(x', y'))) \\ I^{\text{bright}}(x, y) = \max_{c \in \{R, G, B\}} (\max_{(x', y') \in \Omega_b(x, y)} (I^c(x', y'))) \\ \rho^{\text{bright}}(x, y) = \max_{c \in \{R, G, B\}} (\max_{(x', y') \in \Omega_b(x, y)} (\rho^c(x', y'))) \end{cases} \quad (8)$$

据先验知识有 $\begin{cases} \rho^{\text{dark}} = 0 \\ \rho^{\text{bright}} = 1 \end{cases}$,代入式(7)得到

部分高清图像均近似满足明亮通道先验,只有少数失效情况.此外,图 3 ~ 图 4 还展示了几种不同类型图像的明亮通道图,不难看出,有雾或低照度图像的明亮通道值大多远小于 1,而高清图像恰好与之相反.

$$\begin{cases} t(x, y) = 1 - \frac{I^{\text{dark}}(x, y)}{I^{\text{bright}}(x, y)} \\ L(x, y) = I^{\text{bright}}(x, y) \end{cases} \quad (9)$$

将式(9)代入式(6),有

$$\rho^c = \frac{I^c - I^{\text{dark}}}{I^{\text{bright}} - I^{\text{dark}}} \quad (10)$$

由于推导过程中假设了邻域内的透射率与环境光照为恒定值,直接去雾势必会引起块效应问题.因此,本文利用 Guided filter 对初始结果进行细化处理[14],记细化后的 $I^{\text{dark}}, I^{\text{bright}}$ 分别为 $I^{\text{dark}}_{\text{refine}}, I^{\text{bright}}_{\text{refine}}$,则式(10)可更新为

$$\rho^c = \frac{I^c - I^{\text{dark}}_{\text{refine}}}{I^{\text{bright}}_{\text{refine}} - I^{\text{dark}}_{\text{refine}}} \quad (11)$$

为能够直观的看出所提算法的合理性,利用本文算法对亮度不均匀的有雾图像进行处理,并将其恢复效果与 He 算法相比较,如图 5 所示.从图中可以看出,本文算法所估计的环境光照相比于 He 算法得到的天空光照灵活性更强,能够克服光照不均匀的影响;对比图 5(b)与图 5(e)可以发现,本文算法与 He 算法估计出的透射图均能够反映出原图像的深度信息,但本文算法估计的透射值较 He 算法偏低,这意味着本文算法的去雾能力更强.此外,从场景反射率上看,也足以证明本文算法是科学有效的.

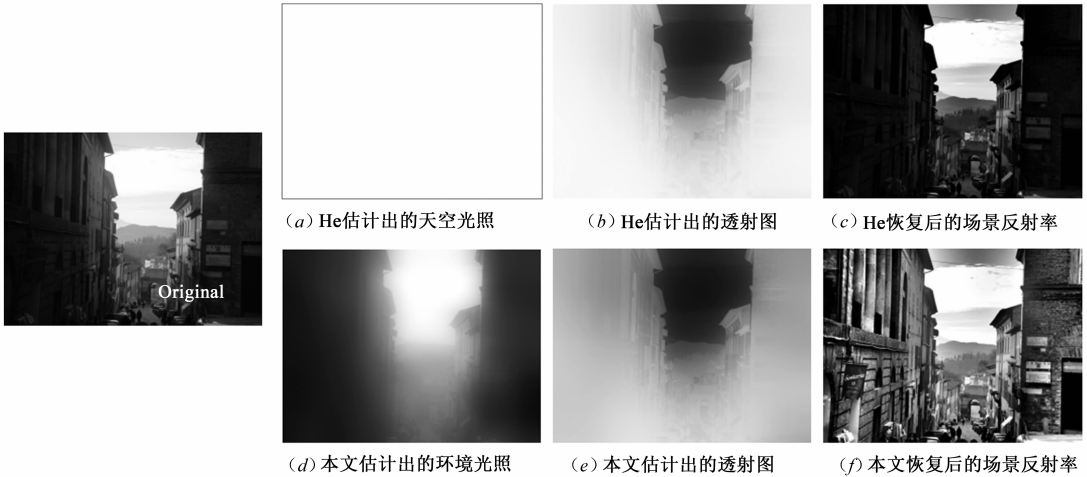


图5 本文算法与He算法处理效果比较($r_d=r_b=15$)

4.2 基于可靠性预测的容错机制

考虑到黑色通道先验并不适用于明亮区域,故上述反射率恢复公式具有一定的局限性.显然,明亮区域具有高亮、平坦以及对角特征[15][16],故可近似认为越符合这三种特征的像素,其黑色通道值越不可靠.据此,我们计算出特征权重图

$$\begin{aligned}
 F(x,y) = & \exp\left(-\frac{(L_I(x,y) - 1)^2}{2\sigma^2}\right) \\
 & \cdot \exp\left(-\frac{(-\nabla I(x,y))^2}{2\sigma^2}\right) \\
 & \cdot \exp\left(-\frac{(-D_I(x,y))^2}{2\sigma^2}\right)
 \end{aligned} \quad (12)$$

式中,标准差 $\sigma = 0.3$, $\nabla I, D_I$ 分别表示梯度图与对角图.上式中,对于靠近 1 的亮度值或接近于 0 的梯度值

和对角值,将会被赋予较大权重.同时,为了尽可能不影响去雾质量,定义可靠性预测函数

$$E(x,y) = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{F(x,y) - F_{\max}}{\lambda}\right)} \quad (13)$$

式中,经验阈值 $\lambda = 0.1$, F_{\max} 为权重图 F 中的最大值.显然,预测指标 $E(x,y)$ 越小,说明反射率恢复误差越大.根据预测后的可靠性分布图 E ,对黑色通道图进行容错,更新 $I_{\text{refine}}^{\text{dark}} = E \cdot I_{\text{refine}}^{\text{dark}}$,则式(11)可变为

$$\rho^c = 1 - \frac{I_{\text{refine}}^{\text{bright}} - I^c}{I_{\text{refine}}^{\text{bright}} - E \cdot I_{\text{refine}}^{\text{dark}}} \quad (14)$$

图 6 给出了不同类型图像容错前后的恢复效果,比较后可看出,容错机制能够在不影响去雾质量的前提下,完全消除偏色现象.

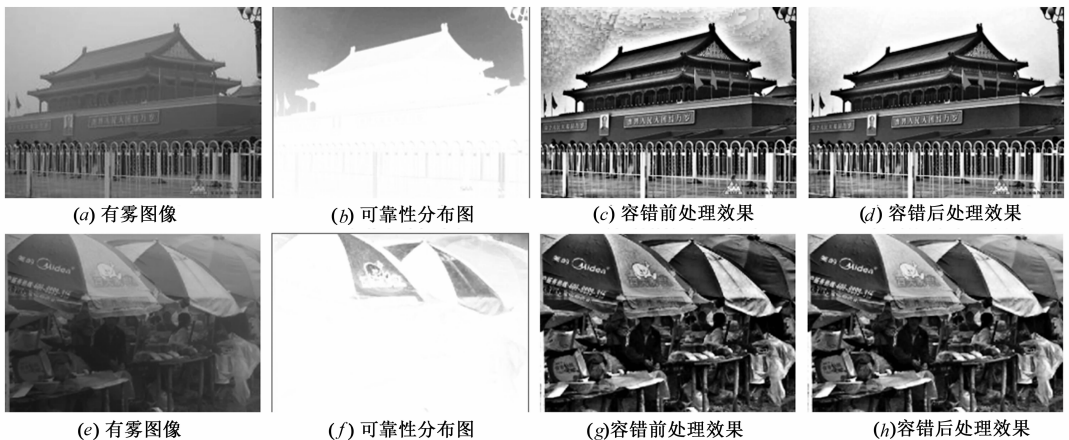


图6 容错前后处理效果对比($r_d=r_b=15$)

5 实验结果与比较

在普通计算机上,利用 matlab(2010b)语言实现了

本文算法(源码下载地址: <http://www.scholat.com/jumingye>).运行环境为 Windows8,计算机配置为 Intel (R) Core(TM) i5 - 4210U CPU @ 1.70GHz with 8.00

GB RAM, 参数设置包括: 在去雾实验中设置 $r_d = 15$ 、 $r_b = 15$, 光照补偿实验中设置 $r_d = 35$ 、 $r_b = 11$.

5.1 去雾实验综合比较

主观比较 为验证本文算法在去雾方面的有效性, 将所得结果与目前最新去雾技术相比较, 包括 Tan 算法^[9]、Nishino 算法^[10]、Fattal 算法^[11]、Tarel 算法^[12]、He 算法^[13]、Gibson 算法^[17]、Kratz 算法^[18]、Ancuti 算法^[19]、Kopf 算法^[20]. 图 7 给出了各算法在不同类型图像上的去雾效果. 从第一组实验中可以看出, Kratz 算法、Ancuti 算法、Tarel 算法以及 Gibson 算法处理后的墙壁均出现了不同程度的色差, 另外从局部特写中可发现, Tarel 算法与 Gibson 算法在深度剧变处分别出现了光晕效应与黑斑效应, 而本文算法在消除雾气的同时, 保持了原始色调, 同时也未引入任何视觉干扰. 在第二

组实验中, 本文算法能够显示更多的纹理细节, 而其余算法虽然局部信息得到了适当放大, 但主观视觉效果仍然较差. 第三组实验也不例外, 本文算法能够在保持去雾质量的前提下, 很好的克服了其余算法所存在的过增强问题.

客观评价 目前应用最为广泛的去雾盲评审指标包括: 图像恢复前后的可见边之比、平均梯度之比以及饱和度^[21]. 选取两幅具有代表性的有雾图像, 采用几种主流去雾算法与本文算法进行定量分析, 不同算法的去雾效果如图 8 所示, 表 1 给出了图 8 中各图像的盲评审指标值, 由数据可以得出, 本文算法的各项指标值大多优于其他算法, 表明本文算法具有更强的去雾能力, 恢复图像的自身信息更为丰富.

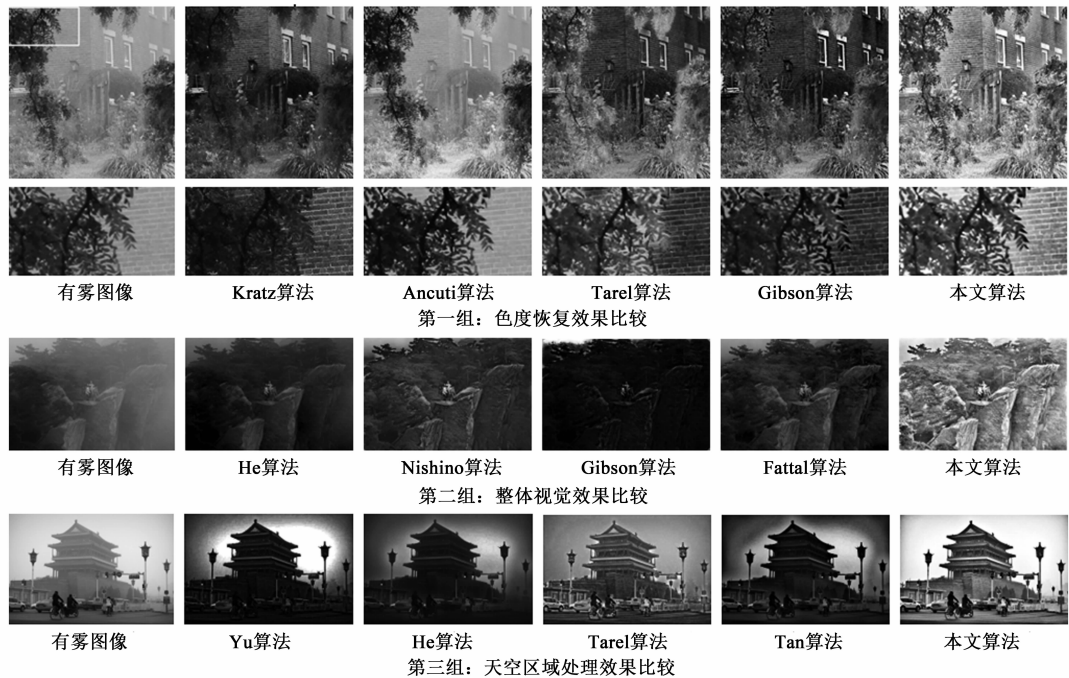


图7 去雾效果综合比较

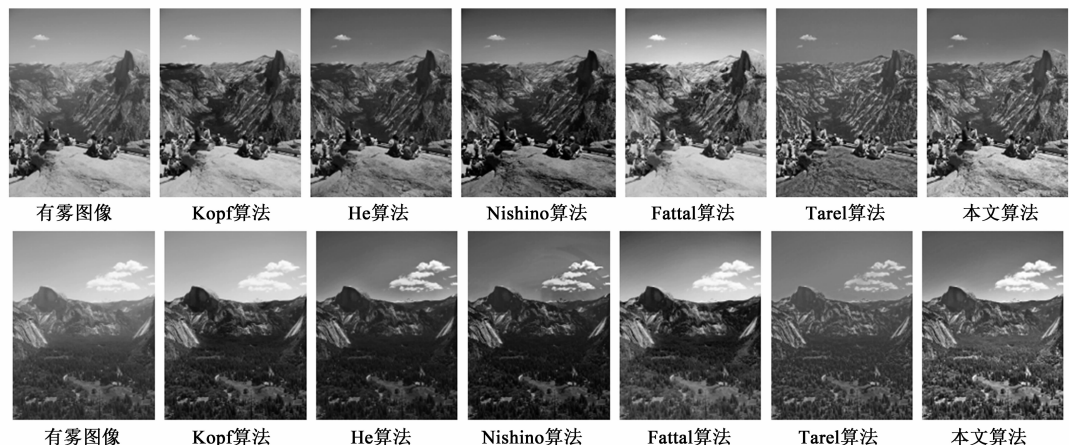


图8 几种主流去雾算法的处理效果

表 1 去雾盲评审指标

去雾算法	第一排			第二排		
	可见边之比	平均梯度之比	饱和度	可见边之比	平均梯度之比	饱和度
Kopf 算法	0.0009	1.3456	0.0028	0.0947	1.6362	0.0001
He 算法	0.1355	1.3757	0.0008	0.1702	1.3165	0.0000
Nishino 算法	0.0776	1.512	0.0316	0.1246	1.7384	0.0070
Fattal 算法	-0.0750	1.8586	0.0002	0.0348	1.8764	0.0009
Tarel 算法	0.4354	2.1016	0.0000	0.2914	1.7482	0.0000
本文算法	0.1046	1.9027	0.0042	0.1454	2.5142	0.0058

5.2 光照补偿实验综合比较

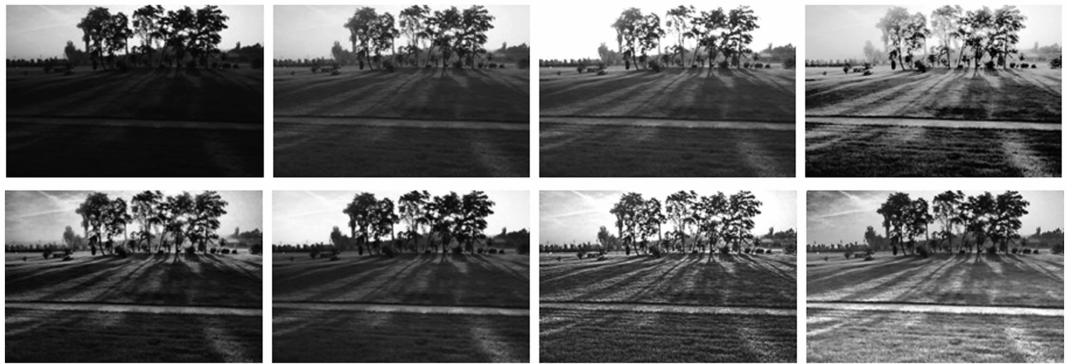
主观比较 在光照补偿实验中,我们将本文算法与几种经典的图像增强技术进行比较,如图 9 所示(每组图像从左至右、从上至下依次分别为降质图像以及同态滤波、自适应对数映射、直方图均衡、限制对比度自适应直方图均衡(Contrast Limited Adaptive histogram

equalization-CLAHE)^[22]、McCann's Retinex 算法^[23]、Deng 算法^[24]的处理结果)。由第一组实验可以看出,仅本文算法保留了原始色调,恢复效果比较接近于实际情况,其余算法虽然提高了整体亮度,但处理后的肤色缺乏真实感。在第二组实验中,本文算法较其他算法光照补偿力度把握的更为恰当,处理后的草地更加符合人眼视觉审美特性。比较最后一组实验可知,本文算法不仅能够最大程度的提高整体对比度,并且还保留了大量纹理细节特征,而其余算法难以在对比度与细节特征两者之间取得平衡,图像增强效果较差。

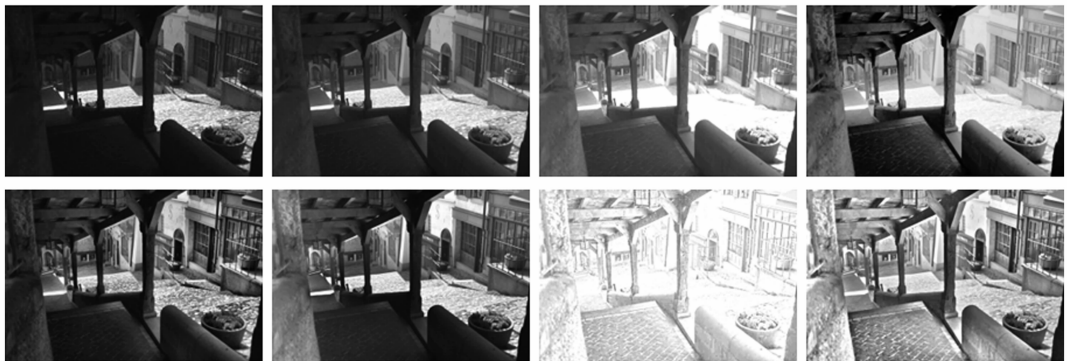
客观评价 以均值、平均梯度以及信息熵作为各算法性能优劣的客观评价标准,图 9 中每组实验的评价指标如表 2 所示,对比数据后可得出,本文算法的各项指标大都处于领先水平,这意味着本文算法在处理低照度图像时同样具有较好的恢复效果,处理后图像的信息量也更为充裕。



第一组: 颜色还原度比较



第二组: 光照补偿能力比较



第三组: 细节保持能力比较

图9 低照度图像处理效果比较

表 2 增强效果客观评价

	第一组			第二组			第三组		
	均值	平均梯度	信息熵	均值	平均梯度	信息熵	均值	平均梯度	信息熵
去雾算法									
原图	0.2935	0.0232	7.4756	0.2568	0.0300	6.8108	0.2589	0.0177	6.9462
同态滤波算法	0.4538	0.0251	7.7133	0.4009	0.0314	7.2096	0.3589	0.0182	7.3237
自适应对数映射算法	0.5188	0.0298	7.6444	0.4809	0.0395	6.8143	0.5693	0.0187	7.0652
直方图均衡算法	0.5057	0.0326	7.9803	0.5115	0.0614	7.9782	0.5088	0.0240	7.9800
CLAHE 算法	0.3965	0.0439	7.7933	0.3535	0.0508	7.5455	0.3483	0.0343	7.5994
Retinex 算法	0.4275	0.0332	7.8460	0.3838	0.0423	7.1626	0.4127	0.0271	7.7002
Deng 算法	0.6719	0.0737	7.1715	0.4726	0.0844	7.5154	0.9005	0.0301	5.5369
本文算法	0.5040	0.0455	7.8320	0.5376	0.0635	7.8842	0.5137	0.0379	7.8599

5.3 其他类型降质图像的恢复效果

本文算法也可应用于其他类型降质图像的恢复处理,图 10 给出了部分测试样例供读者参考.通过大量实

验结果可以得出,本文算法并不局限于去雾或光照补偿方面,通过改变邻域尺寸,便可成为一种具有通用性的图像增强方法.

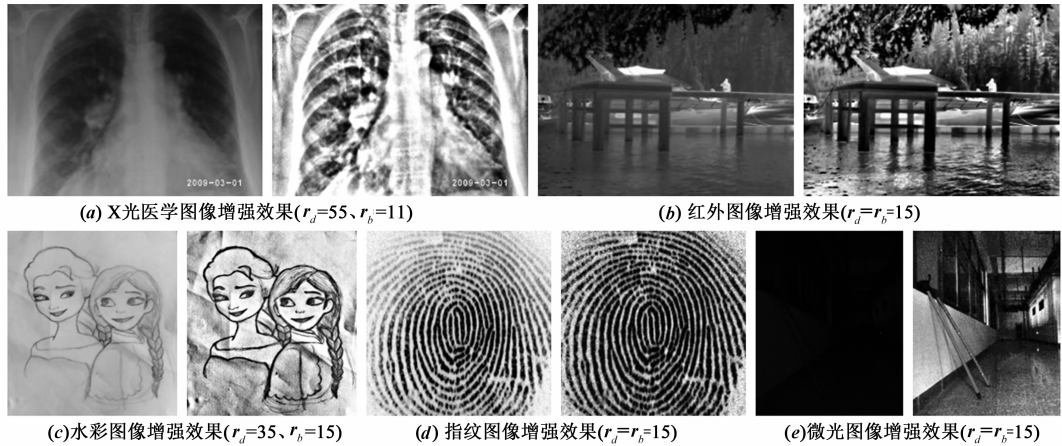


图 10 不同类型降质图像的恢复效果

6 总结

本文在深入研究各类算法的基础上,提出一种基于先验知识与大气散射模型的图像增强算法.该算法以改进后的大气散射模型为出发点,结合先验知识推导出场景反射率的恢复公式.同时,文中还针对黑色通道先验失效情况,提出一种基于可靠性预测的容错机制,提高了黑色通道先验的适用范围.实验结果表明本文算法能够处理不同类型的降质图像,不管是在恢复效果方面,还是在算法鲁棒性方面相比于现有算法大都具有更为出色的表现.

参考文献

- [1] Pizer S M, Amburn E P, Austin J D, et al. Adaptive histogram equalization and its variations[J]. Computer Vision, Graphics, and Image Processing, 1987, 39(3): 355 - 368.
- [2] 吴成茂. 直方图均衡化的数学模型研究[J]. 电子学报, 2013, 41(3): 598 - 602.

WU Cheng-mao. Studies on mathematical model of histogram equalization [J]. Acta Electronica Sinica, 2013, 41(3): 598 - 602. (in Chinese)

- [3] Drago F, Myszkowski K, Annen T, et al. Adaptive logarithmic mapping for displaying high contrast scenes[J]. Computer Graphics Forum, 2003, 22(3): 419 - 426.
- [4] Land E H, McCann J. Lightness and retinex theory[J]. JO-SA, 1971, 61(1): 1 - 11.
- [5] Narasimhan S G, Nayar S K. Contrast restoration of weather degraded images[J]. Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on, 2003, 25(6): 713 - 724.
- [6] Narasimhan S G, Nayar S K. Interactive de weathering of an image using physical model[A]. Proceedings of ICCV Workshop Color & Photometric Methods in Computer Vision [C]. Nice France: IEEE Computer Society Press, 2003. 1387 - 1394.
- [7] Shwartz S, Namer E, Schechner Y Y. Blind haze separation [A]. Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision

- and Pattern Recognition [C]. USA: IEEE, 2006. 1984 – 1991.
- [8] Tan R T. Visibility in bad weather from a single image [A]. Proceedings of the IEEE CVPR [C]. USA: IEEE, 2008. 1 – 8.
- [9] Nishino K, Kratz L, Lombardi S. Bayesian defogging [J]. International Journal of Computer Vision, 2012, 98 (3) : 263 – 278.
- [10] Fattal R. Single image dehazing [J]. ACM Transactions on Graphics, 2008, 27 (3) : 1 – 9.
- [11] Tarel J P, Hautiere N. Fast visibility restoration from a single color or gray level image [A]. Proceedings of the IEEE CVPR [C]. USA: IEEE, 2009. 2201 – 2208.
- [12] He K, Sun J, Tang X. Single image haze removal using dark channel prior [J]. Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on, 2011, 33 (12) : 2341 – 2353.
- [13] Koschmieder, H. Theorie der horizontalen sichtweite [J]. Beitr Phys Freien Atm, 1924, 33 (12) : 171 – 181.
- [14] He K, Sun J, Tang X. Guided image filtering [J]. Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on, 2013, 35 (6) : 1397 – 1409.
- [15] 张登银, 鞠铭焯, 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 Deng-yin, JU Ming-ye, WANG Xue-mei. A fast image daze removal algorithm using dark channel prior [J]. Acta Electronica Sinica, 2015, 43 (7) : 1437 – 1443. (in Chinese)
- [16] Wang J B, He N, Zhang L L, et al. Single image dehazing with a physical model and dark channel prior [J]. Neurocomputing, 2015, 149 (Part B) : 718 – 728.
- [17] Gibson K B, Vo D T, Nguyen T Q. An investigation of dehazing effects on image and video coding [J]. Image Processing, IEEE Transactions on, 2012, 21 (2) : 662 – 673.
- [18] Kratz L, Nishino K. Factorizing scene albedo and depth from a single foggy image [J]. Proceedings, 2009, 30 (2) : 1701 – 1708.
- [19] Ancuti C O, Ancuti C. Single image dehazing by multi-scale fusion [J]. Image Processing, IEEE Transactions on, 2013, 22 (8) : 3271 – 3282.
- [20] Kopf J, Neubert B, Chen B, et al. Deep photo: model-based photograph enhancement and viewing [J]. ACM Transactions on Graphics, 2008, 27 (5) : 32 – 39.
- [21] Hautiere N, Tarel J P, Aubert D, et al. Blind contrast enhancement assessment by gradient ratioing at visible edges [J]. Image Analysis & Stereology Journal, 2008, 27 (2) : 87 – 95.
- [22] Reza A M. Realization of the contrast limited adaptive histogram equalization (CLAHE) for real-time image enhancement [J]. Journal of VLSI Signal Processing Systems for Signal, Image and Video Technology, 2004, 38 (1) : 35 – 44.
- [23] Funt B, Ciurea F, McCann J. Retinex in MATLABTM [J]. Journal of Electronic Imaging, 2004, 13 (1) : 48 – 57.
- [24] Deng G. A generalized unsharp masking algorithm [J]. Image Processing, IEEE Transactions on, 2011, 20 (5) : 1249 – 1261.

作者简介



鞠铭焯 男, 1989 年 1 月出生, 江苏靖江人, 博士生, 研究方向模式识别与机器视觉。
E-mail: 2014070245@njupt.edu.cn



张登银 男, 1964 年 11 月出生, 江苏靖江人, 研究院、博士生导师. 主要研究领域是下一代信息网络、信号与信息处理、网络信息安全。