

基于光补偿和逐像素透射率的图像复原算法

杨燕, 陈高科

(兰州交通大学电子与信息工程学院, 甘肃 兰州 730070)

摘 要: 针对雾霾和沙尘天气下图像降质, 提出一种光补偿色彩复原和逐像素透射率估计的单幅图像可见度复原算法。沙尘颗粒对蓝光吸收导致图像偏黄, 利用光补偿方法可以消除偏色现象并转换为雾图。以最小颜色通道与其高斯函数的比值关系估计透射率, 用中值滤波消除透射率纹理效应, 恢复的透射率深度交替明显, 边缘保持良好, 不需要耗时的后处理操作, 最后根据大气散射模型恢复图像。实验结果表明, 沙尘天气处理效果较好, 雾天图像恢复的图像饱和度适宜, 明亮区域恢复得更为自然, 运行时间较快。

关键词: 光补偿色彩复原; 透射率; 大气散射模型; 去雾

中图分类号: TP391

文献标识码: A

Single image visibility restoration using optical compensation and pixel-by-pixel transmission estimation

YANG Yan, CHEN Gao-ke

(School of Electronic and Information Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: Aiming at image degradation in hazy and sandstorm weather, an optical compensation color restoration and pixel-by-pixel transmissivity estimation algorithm was proposed. The blue light was absorbed by sandstorm particles. The color shift phenomenon could be eliminated by optical compensate method, which convert the sandstorm images into hazy images. Then the ratio relationship between the minimum channel and its Gaussian function as the transmissivity, and median filter was used to eliminate its texture effects. The depth of the restored transmissivity alternated obviously and the edge was well preserved, which did not need the time-consuming postprocessing operativity. Finally, the image was restored by the atmospheric scattering model. The experimental results show that recovered sandstorm image treatment is better, and the saturation of the haze image is appropriate, the bright area is more nature, and running time is faster.

Key words: optical compensate color restoration, transmissivity, atmospheric scattering model, dehaze

1 引言

成像系统采集的户外图像很大程度上受环境的影响, 使图像可见度和对比度严重下降, 直方图分布偏向高灰度级, 从而对图像的分析 and 细节提取等造成了一定障碍。随着环境污染加剧, 我国大部分地区都有雾霾出现, 而在我国西北地区, 常见的还有沙尘天气, 这些自然现象对视频监控、卫星遥感、地质勘测等造成了影响。因此, 如何消除雾霾

和沙尘天气对监测的影响具有重要的理论研究意义和实用价值。

目前, 国内外学者提出了很多经典的去雾算法, 但是处理沙尘天气的研究依然很少。就去雾算法而言, 大致分为 2 类。一类是基于雾天图像的图像增强方法^[1-3], 经典的增强方法有直方图均衡化、多种 Retinex 算法、小波变换和同态变换^[4]。这些方法不考虑图像降质, 适用范围广, 但是很难得到较好的恢复图像, 往往造成恢复的图像对比度过强、

收稿日期: 2016-11-29; 修回日期: 2017-01-17

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.61561030); 甘肃省财政厅基本科研业务费基金资助项目 (No.214138); 兰州交通大学教改基金资助项目 (No.160012)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No.61561030), Fundamental Research Funds for the Gansu Provincial Finance Department (No.214138), Research Fund of Teaching Reform Project of Lanzhou Jiaotong University (No.160012)

部分区域细节丢失等现象。另一类就是基于物理模型的图像去雾算法^[5-7], 这类方法以物理模型为依据, 反演退化过程, 补偿退化过程造成的失真, 从而获得未经干扰退化的无雾图像或无雾图像的最优估计值。这种方法恢复的图像比较自然, 但需要的条件比较苛刻。因此, 强有力的先验条件和假设信息成为了一个突破口。He 等^[5]提出暗通道先验原理, 解决了物理模型病态问题。但后处理操作使算法复杂度增高, 且有很大的局限性。Meng 等^[8]提出边界约束图像复原方法, 通过增加物理模型中参数的约束条件, 恢复无雾图像。这类方法通过牺牲少量细节来获取较好的无雾图像, 方法有效, 但后处理操作依然耗时。对于沙尘天气图像, 由于不满足大气散射模型, 从而使用前面所述的方法很难获得清晰的图像。Huang 等^[9]提出 CA(color analysis)方法来修正沙尘天气图像偏色现象, 最终通过 VR(visibility restoration)方法获得清晰的图像, 该方法没有真正考虑沙尘天气图像的形成原因, 因此, 对于污染严重的图像恢复效果不是很好。

本文提出光补偿色彩复原方法, 解决了单幅沙尘天气图像的偏色问题, 成功地将沙尘天气图像转换为雾天图像。针对暗通道先验算法存在的一些问题, 如光晕现象、暗通道先验逼近问题和块状效应等, 提出一种逐像素透射率估计算法, 该算法利用最小通道与其高斯函数之间的关系估计透射率, 调整高斯函数标准差来补偿天空或明亮区域透射率估计不足, 此外, 采用非线性中值滤波器消除获得的透射率中的纹理效应, 恢复后的透射率局部平滑, 边缘保持良好, 因此, 并不需要耗时的后处理操作, 降低了时间复杂度。

2 图像去雾物理模型

雾天图像的形成过程通常可以用大气散射模型来描述。大气散射模型理论由 McCartney^[10]提出, 由 Narasimhan^[11]推导演化而来。

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

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

其中, I 是获得的雾天图像, J 是场景的辐射强度, 即恢复的无雾图像, A 是全局大气光, t 是透射率, d 是场景到相机的距离, 即场景深度, β 是大气散射系数。式(1)中 $J(x)t(x)$ 为景物直接衰减项, 表示场景光线在传输介质中因大气粒子的散射而衰减的程度,

$V(x) = A(1-t(x))$ 为大气散射光, 它是导致景物亮度和颜色偏移的主要原因。李娟等^[6]通过均值与方差之间的关系来估计 V , 恢复透射率 t , 进而恢复无雾图像。Zhu 等^[12]根据饱和度和亮度值的差值随雾浓度增加而增大的先验知识估计了深度 d , 从而恢复了无雾图像。因此, 根据物理模型的图像去雾方法, 就是将参数向实际不断收敛, 达到最优的去雾效果。

3 暗通道先验

He 等^[5]提出暗通道先验理论, 将大气散射模型中的未知参数进行消元, 使病态的大气散射模型成为一个可解方程。

从概率统计知识出发, He 等提出暗通道操作, 即 2 个最小操作

$$J^{\text{dark}} = \min_{y \in \Omega(x)} \left(\min_{c \in \{r, g, b\}} J^c(y) \right) \quad (3)$$

其中, $\Omega(x)$ 表示最小滤波的滤波窗口, $J^c(y)$ 表示图像 $J(y)$ 在 3 个颜色通道的分量, 利用式(3)对 5 000 多幅清晰图像进行实验统计发现, 86% 的像素值分布在 $[0, 16]$ 范围的灰度级, 因此, 提出暗通道先验理论

$$J^{\text{dark}} \rightarrow 0 \quad (4)$$

根据式(3)的暗通道操作, 对式(1)做如下操作

$$\min_{y \in \Omega(x)} \left(\min_{c \in \{r, g, b\}} I^c(y) \right) = t_h(x) \min_{y \in \Omega(x)} \left(\min_{c \in \{r, g, b\}} J^c(y) \right) + A(1-t_h(x)) \quad (5)$$

因此, 假设大气光值 A 已知, 根据式(4)的暗通道先验知识, 可以得到粗略的透射率为

$$t_h(x) = 1 - \chi \left(\frac{I^{\text{dark}}}{A} \right) \quad (6)$$

其中, χ 是为了保持恢复图像的真实性, 从而在景深的区域保留少量的雾, 取 $\chi = 0.95$ 。

4 本文算法

4.1 光补偿色彩复原

沙尘天气图像质量严重下降, 使图像处理难度增大。不同于雾天图像, 沙尘天气图像偏色特别严重。主要原因是大气中的颗粒介质对光大量反射和散射。其次, 沙尘介质对部分蓝光吸收, 使传播的光颜色单一, 导致沙尘天气图像偏黄。文献[5]的方法则对此类图像失效, 主要原因是蓝色通道强度偏低, 暗通道趋向于较低灰度级, 导致景深的区域估计不准确, 且恢复的图像不能解决偏色问题, 并引入了新的噪声, 如

图 1 所示。文献[8]的方法增加了约束条件,可以获得较好的近景图像,但恢复的图像在较深区域引入更多的噪声。文献[9]的方法恢复效果相对好一点,但仍没有完全解决偏色问题,如图 2 所示。因此,直接利用大气散射物理模型处理沙尘天气图像,不能解决图像偏色问题且会引入新的噪声。

针对沙尘天气图像偏色问题,提出一种光补偿色彩复原的方法,将沙尘天气图像转换为雾天图像处理。雾的浓度主观上很容易被感知,因此,手动挑选大批不同浓度的雾的图像进行实验研究。主观上,浓雾天气介质分布比较均匀,对每个像素的影响程度大

致一样;对于薄雾天气,近景雾往往比较少,因此,深度交替比较明显。但是主观上的发现如何被计算机读懂,这也是一个难题。对其灰度概率分布进行统计发现,通过其 RGB 通道灰度概率分布可以很好地区分薄雾和浓雾,以及沙尘天气,如图 3~图 5 所示,其中,灰度概率分布图横轴表示灰度级[0,255],纵轴表示像素个数。对于浓雾天气,其 RGB 通道的灰度概率分布主要集中于高灰度级,且分布高度集中于某一条曲线;对于薄雾天气,其分布相对分散,但是分布曲线形式大致一样;对于沙尘天气,其分布形状基本一致,其 R 通道分布和 B 通道分布相对 G 通道分布

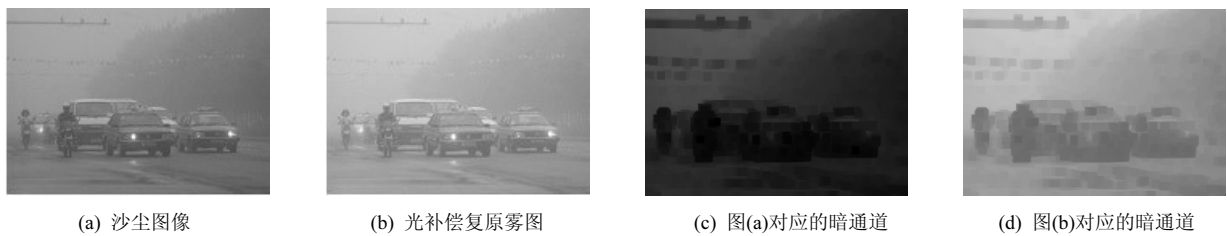


图 1 暗通道图对比

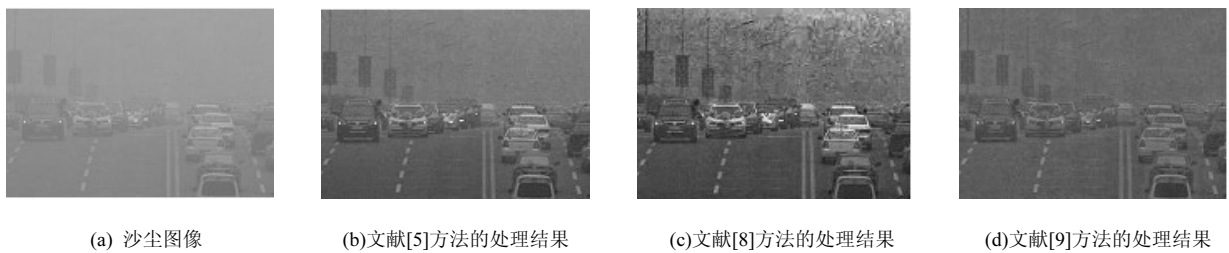


图 2 去雾算法对沙尘天气的处理结果

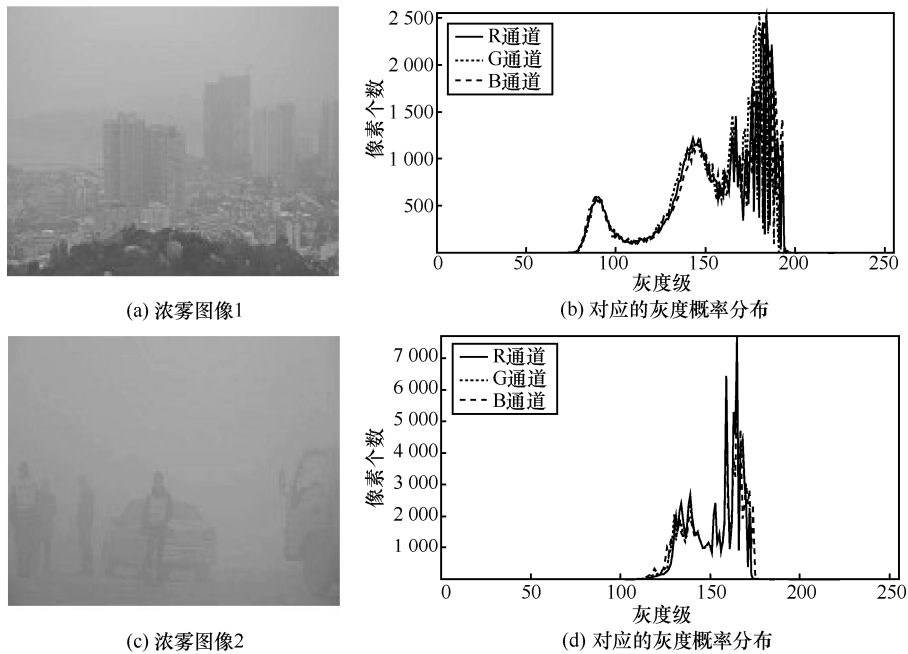


图 3 浓雾图像及对应的灰度概率分布

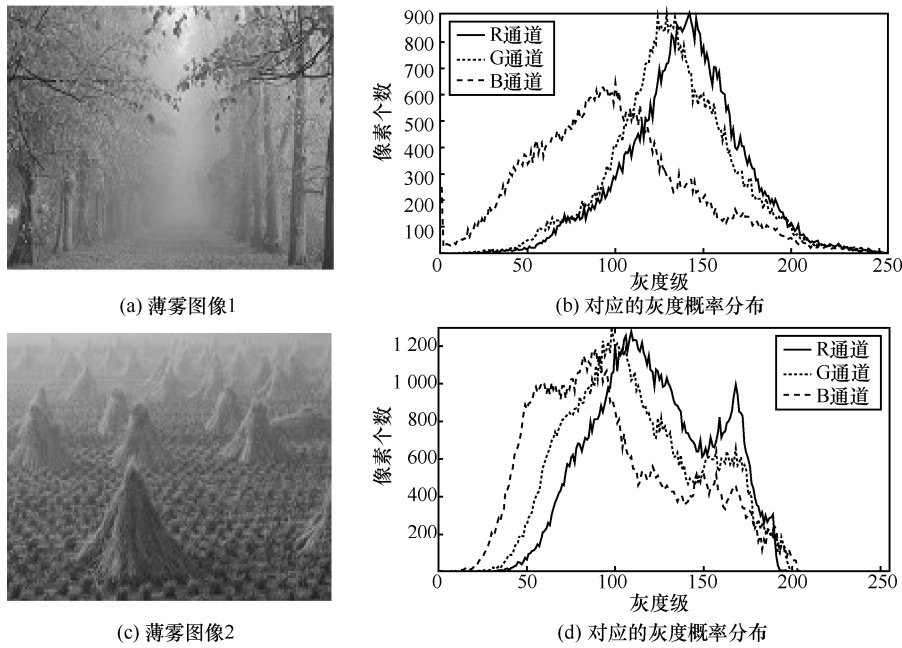


图 4 薄雾图像及对应的灰度概率分布

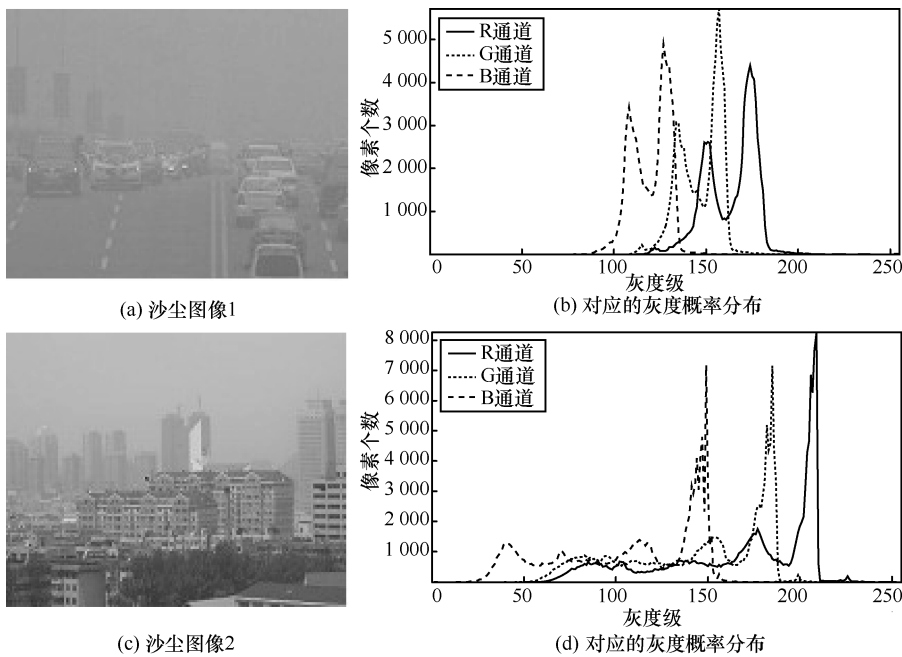


图 5 沙尘天气图像及对应的灰度概率分布

分别趋向于高灰度级和低灰度级。通过对 2 000 多幅浓雾图像和 1 000 多幅沙尘天气图像的灰度概率密度分布统计发现，2 类图像 RGB 通道的灰度概率分布的形状分布一致，并且浓雾图像分布高度一致集中，因此，本文将沙尘天气图像的灰度概率分布进行光补偿，实现色彩复原，并将其转换为浓雾图像。

为了实现上面所提的内容，本文采用直方图匹配的方法^[13]。以 R 通道的灰度概率分布函数为参考，即输出灰度级。令 r 和 z 分别表示输入图像和

输出图像的灰度级，输入灰度级的概率密度函数为 $p_r(r)$ ，输出灰度级的概率密度函数为 $p_z(z)$ 。那么变换函数为

$$s = T(r) = \int_0^r p_r(\omega) d\omega \quad (7)$$

式(7)使概率密度函数 $p_s(s)$ 的灰度级为 s 。假设现在定义一个变量 z ，该变量具有属性

$$H(z) = \int_0^z p_z(\omega) d\omega = s \quad (8)$$

因为要得到的是灰度级为 z 的输出图像，且具有指定的概率密度函数 $p_z(z)$ 。由式(7)和式(8)可得

$$z = H^{-1}(s) = H^{-1}[T(r)] \quad (9)$$

根据式(7)~式(9)，可以将 G 通道和 B 通道的灰度概率分布函数向 R 通道拟合。最终转换的结果如图 6 所示，消除了沙尘天气图像偏色且增加了细节。

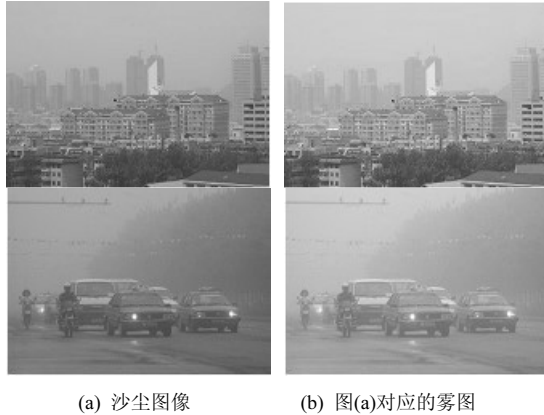


图 6 沙尘图像到雾天图像的转换

4.2 基于物理模型的图像去雾

通过光补偿色彩复原方法可以将沙尘天气图像转换为雾天图像，因此，沙尘天气图像可以通过现有的图像去雾算法进行处理。基于物理模型的去雾算法，可以依据强有力的先验假设进行参数评估^[5,12]，也可以增加未知参数的约束条件^[8]。目前，比较经典的算法当属文献[5]的方法，基本上可以实现大多数的图像去雾。但是依然存在不足，主要有 4 方面的问题。

1) 光晕效应。暗通道先验算法中，滤波窗口选择过小，导致暗通道先验失效。相反，滤波窗口过大，透射率在局部窗口是常量的假设不成立，并导致恢复的图像在深度突变的边缘区域产生强烈光晕现象。文献[5]方法采用 15×15 的滤波窗口满足暗通道先验原理，但会引入光晕。为了解决这一问题，He 等采用耗时的软抠图操作细化透射率，虽然消除了光晕，但时间复杂度增大，不可用于实时处理系统。He 又提出引导滤波^[14]，尽管减小了时间复杂度，但遗留有残晕。

2) 近似的暗通道先验。暗通道先验是一个近似值，并不满足所有像素。由于无雾图像在天空或明亮区域暗通道的像素强度值远大于 0，导致透射率估计产生误差。因此，暗通道先验局限于满足暗通道先验原理的区域：①阴影区域；②色彩鲜艳的区域；③暗物质及表面。

3) 透射率估计不足。基于块操作的暗通道操作，导致恢复的透射率有很强的块状效应，其次，天空或明亮区域由于暗通道先验的使用，恢复的透射率在这些区域明显过小，导致恢复的图像明亮区域过于饱和，天空区域出现色斑。

4) 大气光误差。暗通道先验选取了前 0.1%暗通道最亮像素对应的原始有雾图像的最亮像素强度值作为全局大气光，该像素极易受白色物体和天空区域的影响，导致大气光过大，恢复的无雾图像偏暗。

针对以上问题，提出一种基于暗通道先验的改进算法。根据式(1)~式(5)，透射率的表达式为

$$\tilde{t}(x) = \frac{1 - \frac{I^{\text{dark}}(x)}{A^c}}{1 - \frac{J^{\text{dark}}(x)}{A^c}} \quad (10)$$

其中， $A^c (c \in \{r, g, b\})$ 表示 RGB 通道中的大气光值分量。根据暗通道先验的原理，文献[5]的方法可以得到透射率 t_h 。根据式(4)，暗通道先验只是趋近于 0，但并不满足所有像素，如对于白色对象，其 RGB 的 3 个通道的值都比较大，因此，暗通道操作并不能满足使 J^{dark} 趋近于 0，从而造成透射率评估误差。这也是文献[5]的方法对有大片白色区域和强光区域操作失效的原因所在，同时， t_h 恢复的图像有很强的光晕效应，需要耗时的后处理操作，因此，文献[5]的方法不能用于实时性处理系统。文献[15]的方法通过高斯函数来补偿天空区域或明亮区域的透射率，虽然可以解决透射率估计不足的问题，但基于块的操作仍然存在。本文提出直接逐像素处理方法。

$$\tilde{t}(x) = \frac{1 - \varphi I^{mc}(x)}{1 - \omega e^{-\frac{(1 - I^{mc}(x))^2}{2\sigma^2}}} \quad (11)$$

其中， $I^{mc}(x) = \min_{c \in \{r, g, b\}} I^c(x)$ 、 φ 和 ω 是修正参数，参数 φ 是为了使获取的图像具有保真性，因此，在景深较大的区域保留少量的雾，参数 ω 是一个衰减因子，为了防止分母出现负值。通过大量实验测试，当 $\varphi = 0.95$ ， $\omega = 0.35$ 时恢复效果相对较好。参数 σ 是调整参数， σ 与分母项 $1 - \omega \exp\left(-\frac{(1 - I^{mc}(x))^2}{2\sigma^2}\right)$ 成反比，当 σ 越小时， $\tilde{t} \rightarrow 1 - \varphi I^{mc}$ ，可以准确地估计景深较小区域的透射率；当 σ 较大时， $\tilde{t} > 1 - \varphi I^{mc}$ ，此时可以补偿暗通道先验失效的区域，

从而间接消除暗通道先验不成立时造成的估计误差，通过大量的实验，取 $\sigma = 0.15$ 。根据式(2)，在大气介质均匀分布的情况下，透射率 t 反映了深度情况。考虑到纹理效应近似于椒盐噪声，非线性中值滤波器有很好的识别能力，最终复原的透射率为

$$t(x) = \underset{y \in \Omega(x)}{\text{median}} \tilde{t}(y) \quad (12)$$

式(12)选用 15×15 像素的滤波窗口。最终得到的透射率如图 7(b)所示。

从图 7 可以看出，本文算法恢复的透射率细节清晰，而且深度交替明显，因此，不需要后处理操作来消除光晕现象，同时，消除了最小操作引起的块状效应。文献[5]的方法恢复的透射率严重受到块状效应影响，从而引起在局部深度交替的区域产生误差，同时，文献[5]的方法在近景得到的透射率过大，会引起恢复的图像过度饱和。

大气光是大气散射模型中一个重要的参数。对于大气光的选择，本文利用文献[16]的方法。根据物理模型，对于一幅图像，考虑全局大气光，假设对图像进行分块(一般考虑是 3~15 个像素)后，每一小块就可以看成一幅图像，因此，所有小块的全局大气光构成整幅图像的局部大气光。局部大气光可以消除一些干扰像素(如强光源像素)对大气光的选择造成的影响。

$$A(x) = \text{crossbilateral} \left(\bullet \max_{c \in \{r, g, b\}} I^c(x), \max_{c \in \{r, g, b\}} I^c(x) \right) \quad (13)$$

其中，符号“ \bullet ”表示形态学闭操作，本文采用 square 的结构元素，结构半径 $r = \frac{\min(h, w)}{100}$ ， h 和 w 分别

为图像的高和宽，*crossbilateral* 表示交叉双边滤波器。 $\max_{c \in \{r, g, b\}} I^c$ 用于保持边缘。

结合式(1)、式(12)和式(13)，可以恢复图像

$$J(x) = \frac{I(x) - A(x)}{\max(t(x), t_0)} + A(x) \quad (14)$$

其中，下限 t_0 是为防止分母项趋于 0。

5 实验结果与性能分析

本文方法在 Matlab R2014a 环境下运行，硬件环境为 Intel(R) Core(TM) i3-3110M CPU @2.40 GHz，6.0 GB RAM。为了验证本文方法的有效性和实时性，对大量图像进行了实验对比。

5.1 视觉效果对比分析

实验首先对沙尘天气图像进行了光补偿色彩复原操作，将其转换为雾天图像，消除了图像偏色现象，最终利用逐像素算法复原图像，可以看出复原的图像相对原始图像细节明显增多，对比度明显增强，可视度相对原沙尘图像明显提升。本文算法最终复原的效果如图 8(b)所示，而文献[9]通过颜色调整的方法恢复的图像效果相对本文算法较差，对于沙尘浓度高的图像则失效，如图 8(c)中间的图像所示，其次，文献[9]算法复原的图像出现过度饱和、图像偏色现象依旧存在，远景细节复原较少。

接下来利用逐像素透射率估计算法处理雾天图像。实验选取了文献[17]、文献[5]、文献[8]、文献[7]以及文献[12]的方法与本文方法进行对比。这些方法是目前去雾方法中具有代表性的。

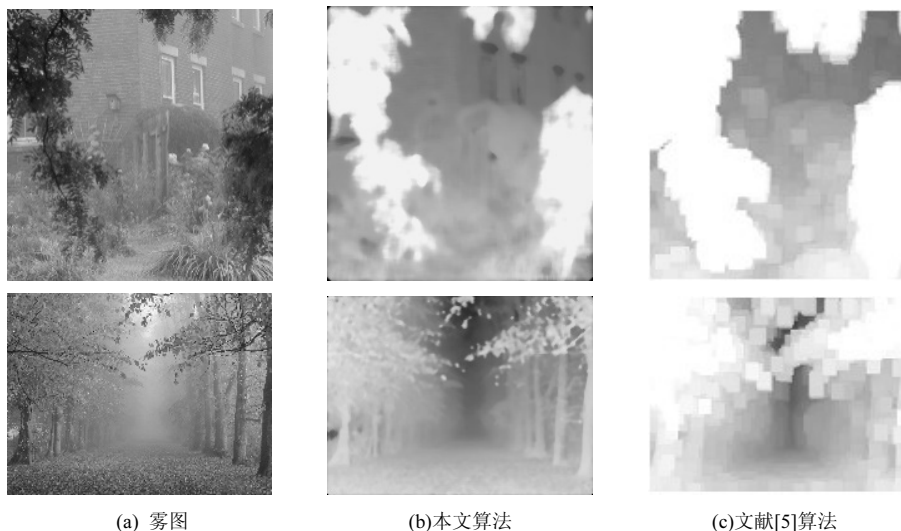


图 7 透射率对比

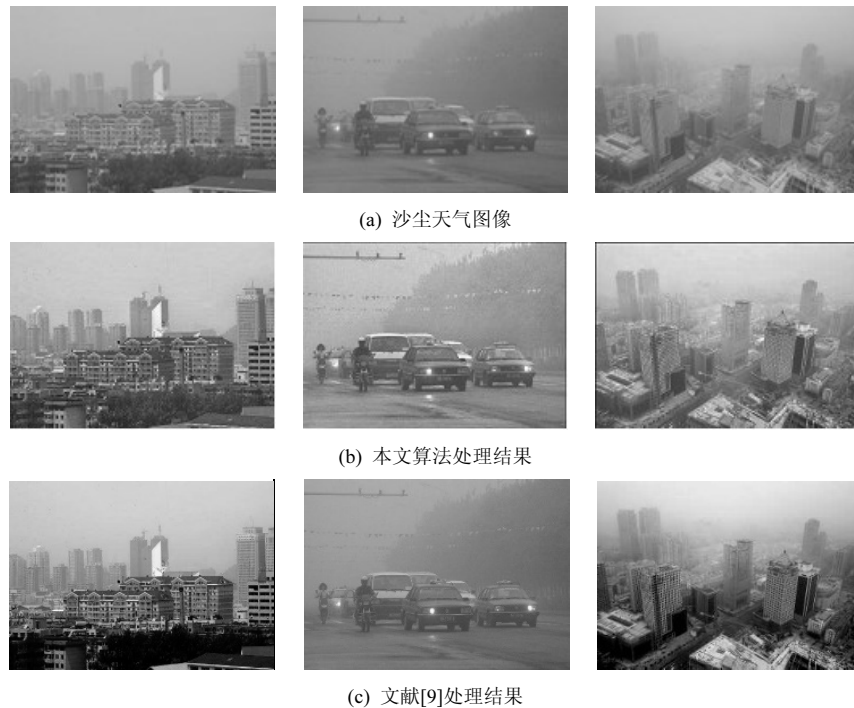


图 8 沙尘天气图像复原结果及对比

图 9 给出了文献[17]的方法与本文方法的去雾效果对比, 从图 9 中可以看出本文方法恢复的图像颜色更加自然, 饱和度更加适宜。图 10 为文献[7]的方法与本文方法的恢复效果对比, 文献[7]的方法恢复的图像在深度较深的区域细节较少, 并可能受邻近像素影响发生颜色偏移。图 11 为本文方法和文献[8]的方法恢复去雾效果对比, 文献[8]的方法复原的图像颜色过于饱和, 如图 11 恢复的效果出现偏色现象, 且恢复结果有伪影存在。图 12 为文献[5]方法复原的无雾图像与本文算法的对比, 文献[5]的方法复原的图像在边缘存在大量残晕, 而本文方法复原的图像消除了残晕。图 13 为文献[12]的方法和本文方法的对比, 文献[12]的方法恢复的图像偏暗且景深较深区域去雾不彻底。

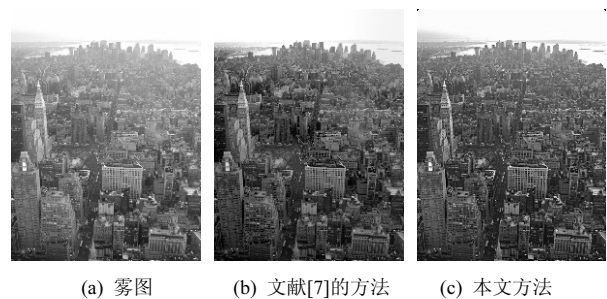


图 10 本文方法与文献[7]方法的恢复效果对比



图 11 本文方法与文献[8]方法的恢复去雾效果对比



图 9 本文方法与文献[17]方法的去雾效果对比

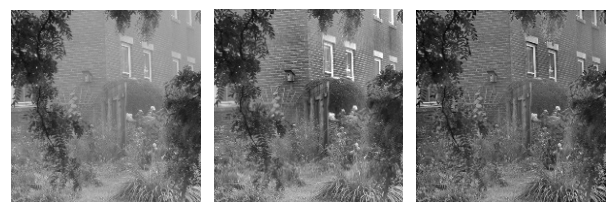


图 12 本文方法与文献[5]方法的复原无雾图像对比



(a) 雾图 (b) 文献[12]的方法 (c) 本文方法

图 13 本文方法与文献[12]方法的对比

综上所述，本文方法逐像素透射率算法复原的图像优于基于物理模型和先验假设的去雾方法，恢复的效果更加自然，细节更加突出。其原因在于假设不成立时，导致复原的图像过度饱和，产生光晕、伪影等现象，如文献[17]方法和文献[7]的方法。其次，暗通道先验是一个近似假设问题，不满足所有的像素，导致透射率在明亮区域估计过小，引导滤波的使用不能彻底消除光晕。文献[8]的方法用边界的约束条件来迭代复原深度图，导致复原的图像过度饱和。

5.2 客观分析

目前，对于去雾效果的客观评价方法为数不多，比较常用的是 Hautiere^[18]提出的基于可见边的对比度增强的评价方法。利用新增的可见边(e)、归一化的平均梯度(\bar{r})以及恢复图像的饱和点的个数(τ)来表征图像去雾效果。 e 和 \bar{r} 的值越大表征复原的图像效果越好，而 τ 的值越小越好。其表达式分别为

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

$$\bar{r} = \exp \left[\frac{1}{n_r} \sum_{P_i \in \varphi_r} \lg r_i \right] \quad (16)$$

$$\tau = \frac{n_s}{w \times h} \quad (17)$$

其中， n_0 是原有雾图像的可见边数， n_r 是复原图像的可见边数， r_i 是 P_i 处复原图像与原有雾图像的梯度比， φ_r 是复原图像的可见边的集合， n_s 表示饱和和像素点数， w 和 h 分别表示图像的宽和高。

从表 1 的数据可以看出，本文方法复原的图像没有过度饱和的像素点，复原图像的新增可见边和平均梯度都优于文献[5]的方法，尤其对于沙尘天气图像的处理。文献[17]的方法和文献[7]的方法恢复的图像的可见边有负值出现，说明恢复的图像细节没有增强，反而衰减。本文算法处理一幅 768×575 的图像平均需要 3.5 s，而文献[17]、文献[5]和文献[7]的方法大约需要 5 min、20 s 和 30 s 的运行时间。

6 结束语

为了改善劣质环境下户外图像的清晰度和对比度，便于图像特征和细节的识别与提取，本文采用光补偿色彩复原的方法将劣质环境下的户外图像归纳为一类问题，即图像去雾问题。光补偿算法对沙尘天气图像进行蓝光和部分绿光补偿，从而消除最终的偏色(黄色)现象，最终复原结果颜色适宜，便于用去雾算法进行处理。为了消除雾气对图像质量的影响，本文提出一种基于暗通道先验的逐像素透射率估计算法。该算法可以消除最小滤波引起的后处理操作，可以很好地处理较亮区域的透射率估计，减小暗通道先验造成的误差。获得的图像具有较好的清晰度和可视度，明亮适宜且更接近真实。但是局部大气光使用了交叉双边滤波，算法复杂度整体不是很理想。接下来的工作是训练透射率估计

表 1 去雾结果客观评价

实验图像	文献[17]方法			文献[7]方法			文献[5]方法			本文方法		
	e	τ	\bar{r}	e	τ	\bar{r}	e	τ	\bar{r}	e	τ	\bar{r}
图 8(a)左图	—	—	—	—	—	—	0.34	0.02	1.18	0.96	0	1.50
图 9(a)	0.08	0.01	2.28	0.04	0.020	1.23	0.08	0.01	1.33	0.14	0	1.37
图 10(a)	-0.14	0.02	2.34	-0.06	0.086	1.32	0.06	0	1.42	0.09	0	1.42
图 11(a)	-0.08	0.01	2.08	0.03	0	1.27	0.06	0	1.42	0.09	0	1.66
图 12(a)	-0.04	0.01	1.78	0.08	0.060	1.24	0.06	0	1.38	0.12	0	1.51
图 13(a)	0.03	0.02	2.04	-0.02	0	1.16	0.09	0.01	1.24	0.08	0	1.47

时的参数,使最终的去雾效果更彻底,同时提高去雾处理速度,降低算法的复杂度。

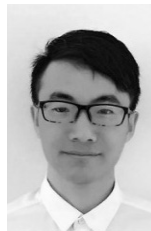
参考文献:

- [1] 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.
WANG P, ZHANG C, LUO Y X. Fast algorithm to enhance contrast of fog degraded images[J]. Computer Applications, 2006, 26(1): 152-154.
- [2] 禹晶,徐冬彬,廖庆敏.图像去雾技术研究进展[J].中国图像图形学报,2011,16(9):1561-1576.
YU J, XU D B, LIAO Q M. Image defogging: a survey[J]. Journal of Image and Graphics, 2011, 16(9): 1561-1576.
- [3] 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]. Computer Applications, 2010, 30(9): 2417-2421.
- [4] 郭璠,唐璠,蔡自兴.基于融合策略的单幅图像去雾算法[J].通信学报,2014,35(7):199-207.
GUO F, TANG J, CAI Z X. Single image defogging based on fusion strategy[J]. Journal on Communications, 2014, 35(7): 199-207.
- [5] 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.
- [6] 李娟,张有会,王志巍,等.基于局部均值和标准差的图像去雾算法[J].计算机工程与应用,2016,52(5):215-219.
LI J, ZHANG Y H, WANG Z W, et al. Fog-degraded image restoration using local mean value and standard deviation[J]. Computer Engineering and Applications, 2016, 52(5): 215-219.
- [7] FATTAL R. Single image dehazing[J]. ACM Transactions on Graphics, 2008, 27(3): 1-9.
- [8] MENG G F, WANG Y, DUAN J Y. Efficient image dehazing with boundary constraint and contextual regularization[C]//The IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV). 2013: 617-624.
- [9] HUANG S C, CHEN B H, WANG W J. Visibility restoration of single haze images captured in real-world weather conditions[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2014, 24(10): 1814-1824.
- [10] MCCARTNEY E J. Optics of the atmosphere: scattering by molecules and particles[M]. New York: John Wiley and Sons, Inc, 1976:23-32.
- [11] NARASIMHAN S G, NAYAR S K. Vision and the atmosphere[J]. International Journal of Computer Vision, 2002, 48(3):233-254.
- [12] ZHU Q S, MAI J M, SHAO L. A fast single image haze removal algorithm using color attenuation prior[J]. IEEE Transactions on Image Processing A Publication of the IEEE Signal Processing Society, 2015, 24(11): 3522-3533.
- [13] 冈萨雷斯,伍兹,埃丁斯著.阮秋琦译.数字图像处理(MATLAB版)[M].北京:电子工业出版社,2005.9.
GONZALEZ R, WOODS R, EDDIVS S. RUAN Q Q translation. Digital image processing using MATLAB[M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2005.9.
- [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] YU T, RIAZ I, PIAO J C, et al. Real-time single image dehazing using block-to-pixel interpolation and adaptive dark channel prior[J]. IET Image Processing, 2015, 9(9):725-734.
- [16] SUN W, WANG H, SUN C H, et al. Fast single image haze removal via local atmospheric light veil estimation[J]. Computers & Electrical Engineering, 2015, 46(C):371-383.
- [17] TAN R. Visibility in bad weather from a single image[C]//IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. 2008.
- [18] HAUTIERE N. Blind contrast enhancement assessment by gradient ratioing at visible edges[J]. Image Analysis & Stereology Journal, 2008, 27(2): 87-95.

作者简介:



杨燕(1972-),女,河南临颖人,博士,兰州交通大学教授、硕士生导师,主要研究方向为数字图像处理、智能信息处理、语音信号处理。



陈高科(1992-),男,甘肃平凉人,兰州交通大学硕士生,主要研究方向为数字图像处理。