

# 基于指数映射与自适应权重能量函数的图像去雾方法

洪文强, 杨燕\*

兰州交通大学电子与信息工程学院, 甘肃 兰州 730070

**摘要** 现有图像去雾算法在复原含明亮区域的雾天图像时,存在色彩失真、偏色、亮度低等问题。针对现有算法的不足,提出一种基于指数映射与自适应权重能量函数的单幅图像去雾算法。首先结合图像暗通道值的统计规律,利用指数函数衰减特性,构建清晰图像暗通道与有雾图像暗通道的指数映射模型,并根据所获得的暗通道估计值求解出透射率估计值;其次,根据图像的马尔可夫性,构建基于马尔可夫网的自适应权重能量函数,对透射率进行优化,并使用降采样方法降低算法复杂度;最后,利用优化后的透射率估计值与局部大气光值复原出无雾图像。实验对比结果表明,该算法复原结果视觉效果清晰、色彩保真度高,并且多项客观评价参数在实验对比中取得了最高值,其中直方图相关系数达到了 0.4521,高出对比算法的平均表现 67.3%。综上所述,该算法较好地解决了包含明亮区域的有雾图像复原问题。

**关键词** 图像处理; 图像去雾; 暗通道; 指数映射; 自适应权重能量函数

中图分类号 TP391

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.1015004

## Image Dehazing Algorithm Based on Exponential Mapping and Adaptive Weight Energy Function

Hong Wenqiang, Yang Yan\*

*School of Electronics and Information Engineering, Lanzhou Jiaotong University,  
Lanzhou 730070, Gansu, China*

**Abstract** Existing image dehazing algorithms have problems in restoring hazy images with bright areas, such as color distortion, color offset, and brightness reduction. Aiming at the shortcomings of existing methods, a single image dehazing algorithm is proposed based on exponential mapping and adaptive weight energy function. Firstly, according to statistical law of the dark channel prior, the attenuation characteristics of the exponential function are utilized to construct a dark channel mapping model between clear image and hazy image. Subsequently, the estimated value of the transmission can be calculated based on that of obtained dark channel. Secondly, according to the Markov property of images, a Markov network-based adaptive weight energy function is constructed to optimize the transmission and the down-sampling method is used to reduce the algorithm complexity. Finally, the haze-free image is restored by using the optimized transmission and local atmospheric light. The experimental results show that the restored images of the proposed algorithm have clear visual effects and high color fidelity. And several objective evaluation parameters reach the highest values. The histogram correlation coefficient reaches 0.4521, which is 67.3% higher than those of the average performance of comparison algorithms. In summary, the proposed algorithm can effectively solve the recovery problems of hazy image with bright areas.

**Key words** image processing; image dehazing; dark channel; exponential mapping adaptive weight energy function

收稿日期: 2021-03-10; 修回日期: 2021-04-21; 录用日期: 2021-05-18

基金项目: 国家自然科学基金(61561030)、兰州交通大学研究生教改项目(JG201928)

通信作者: \*yangyantd@mail.lzjtu.cn

## 1 引言

随着成像技术的快速发展和应用,计算机视觉系统已在众多领域被广泛使用。现有计算机视觉应用通常需要采集高质量的清晰图像作为后续处理的基础,而在雾、霾天气条件下,由于空气中存在大量悬浮微粒,可见光受到颗粒物吸收和散射的影响,户外成像设备捕获的图像出现明显的可见度降低现象,严重干扰后续的高级视觉任务。因此,雾、霾条件下的图像清晰化处理具有重要的研究意义。

作为计算机视觉的重要预处理步骤,雾霾图像清晰化技术受到了广泛的关注,其中单幅图像去雾任务更是研究的重点和难点。目前针对单幅图像去雾算法的研究主要被归为三类:基于图像增强的方法、基于图像复原的方法、以及基于机器学习的方法。其中图像增强是单幅图像去雾领域初期常用的方法,此类方法主要是通过对图像的亮度、对比度等信息进行增强以提升视觉效果,其代表性方法是基于 Retinex 理论的去雾方法。但此类方法未深入分析雾天图像退化的本质原因,仅从视觉效果出发改善图像质量,不能达到令人满意的效果。

以物理模型为理论基础的图像复原方法<sup>[1-12]</sup>目前应用最为广泛,也是相对成熟的去雾方法。该方法以大气散射模型为理论依据,通过先验知识对模型中的未知参数进行估计,逆向求解出清晰图像,达到去雾目的。He 等<sup>[3]</sup>以对自然图像统计分析的结果为依据,提出暗通道先验去雾算法,该方法为图像去雾领域提供了一种简洁高效的解决思路,但受限于该先验知识的局限性,对包含高反射率区域的图像处理效果不佳。Meng 等<sup>[4]</sup>提出通过边界约束方法对透射率进行限制,但部分图像会出现偏色。Shu 等<sup>[5]</sup>提出一种混合正则化变分框架来估计目标场景的深度图和无雾图像,引入二阶广义变量正则化来约束深度图,但在天空区域较大的情况下会出现透射率过渡不平滑的问题。Gao 等<sup>[6]</sup>提出自构造图像融合的单图像去雾方法,通过构建多个具有不同曝光量的自构图像近似捕获全局大气光值,但融合权重的选取会对图像复原效果产生较大影响。

随着机器学习理论的兴起,基于机器学习的去雾方法在近年受到了较大关注,此类方法彻底脱离了依靠先验信息和约束条件来人工设计去雾模型所需参数的途径,转而通过设计有效的网络结构,在巨量图片数据集的训练下获得具有良好去雾效

果的神经网络。Cai 等<sup>[13]</sup>通过将网络架构与大气散射模型结合的方法,设计了一种端到端的去雾网络。Ren 等<sup>[14]</sup>提出多尺度卷积网络捕获去雾过程中不同尺度的特征信息。Hodges 等<sup>[15]</sup>提出通过孪生网络体系结构对不匹配的图像训练以进行图像去雾,利用更小的训练集达到较好去雾性能。基于机器学习的方法虽然通常能获得较好的复原效果,但所耗费的计算资源通常较大,并且模型本身缺乏可解释性,不利于实际应用,同时现有去雾数据集以合成雾图为主,与真实环境下的退化图像有一定的差距,因此在真实环境下的应用有一定局限。

现有大量的基于物理模型的图像复原方法都是以暗通道先验理论为基础改进的,主要集中于解决天空区域透射率估计不准确的问题。改进方法通常采用图像分割算法<sup>[7]</sup>,将天空区域分割并对其透射率补偿。由于图像的多样性,分割天空区域的方法准确性不稳定,泛化处理的能力较低。针对上述问题,本文基于对大量图像的统计分析,提出图像暗通道值的指数映射关系,获得更适应天空区域的透射率估计方法,并通过构建自适应权重能量函数,对透射率进行平滑优化,避免了映射过程中因噪声等问题产生的透射率跳变现象。实验结果表明,所提算法具有良好的去雾效果。

## 2 暗通道先验缺陷

根据米散射理论,Narasimhan 等<sup>[8]</sup>通过对雾天条件下的图像成像过程的建模分析,推导出简化的大气散射模型:

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

式中: $I(x)$ 是成像系统捕获的有雾图像,在单幅图像去雾中是唯一能直接获取的数据; $J(x)$ 是待求解的复原结果; $t(x)$ 是透射率,反映了光线在雾气中的衰减程度; $A$ 是大气光值,能反映场景中光照强度。文献[3]提出对清晰图像执行暗通道操作,分析其像素值分布具有的统计规律:

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

式中: $J^{\text{dark}}$ 为无雾图像的暗通道值; $C$ 为图像的某一个彩色通道; $\Omega(x)$ 为暗通道操作窗口。暗通道先验理论认为,清晰无雾的图像存在部分像素点,至少在 RGB 某一通道中的像素值接近于 0,即  $J^{\text{dark}} \rightarrow 0$ ,假设全局大气光  $A$  已知,结合式(2)可得到透射率计算公式为

$$t_h = 1 - \frac{I^{\text{dark}}}{A}, \quad (3)$$

式中,  $I^{\text{dark}}$  表示有雾图像的暗通道值。根据式(3)可以看出,暗通道先验算法将复原图像暗通道值全部估计为0,但对于图像中的高亮区域或天空区域,由于其实际暗通道值大于0,因此使用暗通道先验算法会导致该区域透射率估计过小,使得复原图像整体偏暗,并且出现色彩偏移等失真现象。

### 3 本文算法

本文算法流程如图1所示。首先,采用局部大

气光估计方法获取大气光值;其次,对有雾图像执行暗通道操作,利用无雾图像暗通道与有雾图像暗通道之间的指数映射模型,获得无雾图像的暗通道估计值,并以此求解出初始透射率;然后,根据图像的马尔可夫性,构建基于马尔可夫网的自适应权重能量函数对初始透射率进行优化,并采用降采样方法降低算法复杂度,获得透射率最优解;最后,将透射率最优解与局部大气光值代入大气散射模型复原出无雾图像。

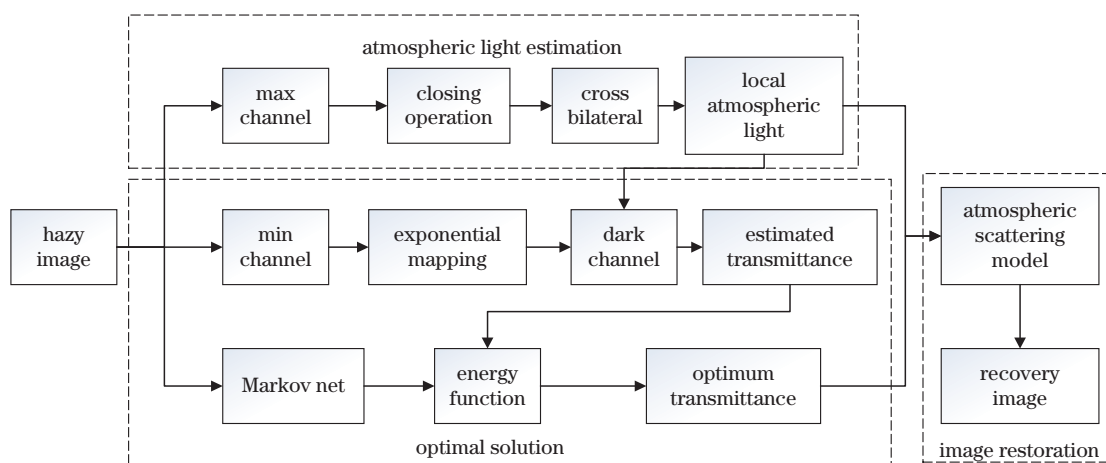


图1 算法流程图

Fig. 1 Flowchart of algorithm

#### 3.1 局部大气光估计

目前图像去雾算法研究领域,针对大气光值选取的研究主要有全局大气光值和局部大气光值两种思路。文献[3]将大气光区域定位于具有最高暗通道值的前0.1%像素点,选取这些像素点对应输入图像上最大的像素值作为大气光值;文献[9]对输入图像的RGB三个颜色通道分别进行最小滤波操作,选取各颜色通道中的最大值构成大气光值;文献[10]通过判断大气光矢量方向确定大气光值。文献[3]和文献[9]的方法在存在强光源或大片白色区域像素时会出现大气光值判断失误;文献[10]则可能存在大气光矢量方向判断不准确的问题。为保证整体去雾效果不受全局大气光值判断失误的影响,本文采用文献[11]的局部大气光值估计方法,具体过程如下:

- 1) 对输入有雾图像执行最大值操作,执行窗口半径为输入图像尺寸的10%;
- 2) 执行形态学闭操作,通过膨胀腐蚀消除局部像素的干扰;
- 3) 使用交叉双边滤波消除块状结构并保持图

像边缘信息,获得局部大气光值  $A$ 。

#### 3.2 暗通道映射模型

为解决暗通道先验理论在天空区域失效的问题,本文从真实有雾图像数据集RTTS和合成图像数据集RESIDE中各选取了1200幅包含天空区域的有雾图像和清晰图像进行统计分析。将所选图像分割为尺寸相同的子图块,并对所有子图块执行最小通道操作,获取像素级暗通道值。分别对有雾图像和清晰图像暗通道值统计后发现,有雾图像暗通道值呈现出近似钟型的凸型分布,而清晰图像暗通道值则呈现左高右低的凹型分布,如图2所示。从该分布情况可以发现,雾气使图像暗通道值分布的峰值点向右偏移,而在高亮区域(即暗通道值较高的区域)则呈现相近的分布趋势。

为进一步分析有雾图像和清晰图像暗通道值之间的相关性,对图像的天空区域与非天空区域的暗通道值进行对比。如图3所示,在天空区域(左上角),有雾图像暗通道值与大气光值相差极小,其对应清晰图像暗通道值几乎相同;在非天空区域(中间及右下角),有雾图像暗通道值与大气光值相差

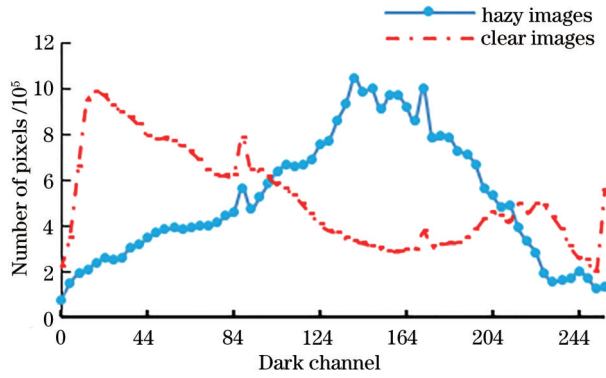


图 2 暗通道值分布情况

Fig. 2 Distribution of dark channel

逐渐增大,其对应清晰图像暗通道值迅速向 0 衰减。

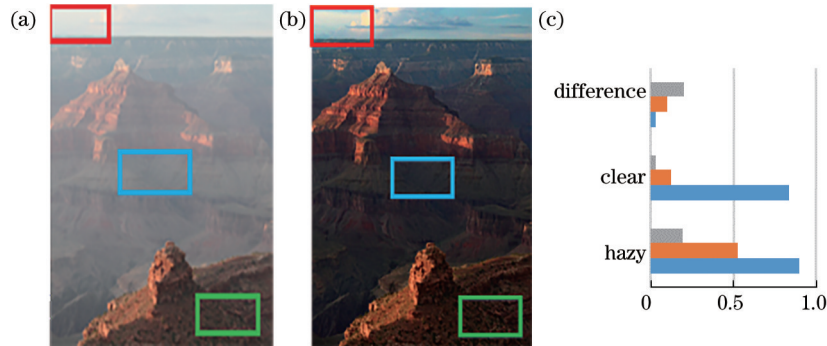


图 3 有雾图像与清晰图像暗通道对比。(a)有雾图像;(b)清晰图像;(c)暗通道值对比

Fig. 3 Dark channel contrast between hazy and clear images. (a) Hazy image; (b) clear image; (c) contrast of dark channels

为验证该指数映射模型的有效性,将经过式(4)处理后的有雾图像子图块加入统计分析,分析结果如图 4 所示。通过观察可以发现,经过处理后得到的映射值分布与清晰图像呈现出较高的相似性,因此本文所提方法具有一定的可行性。

根据式(1)和式(4),得到初始透射率估计值为

$$t' = \frac{A - I^{\text{dark}}}{A - \hat{J}^{\text{dark}}}, \quad (6)$$

式中,  $t'$  为估计透射率。

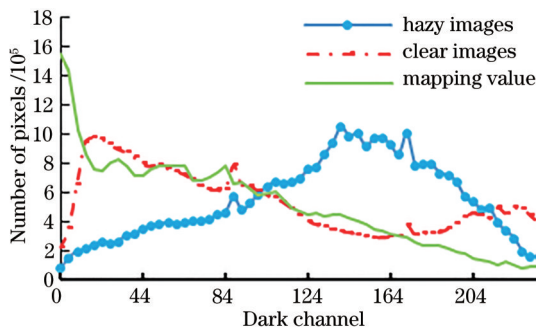


图 4 指数映射模型有效性分析

Fig. 4 Validity analysis of exponential mapping model

该衰减趋势与指数衰减有极高的相似性,因此提出一种清晰图像与有雾图像暗通道的指数映射模型:

$$\hat{J}^{\text{dark}} = I^{\text{dark}} \cdot e^{-B}, \quad (4)$$

$$B = \frac{A^2 - (I^{\text{dark}})^2}{I^{\text{dark}} \cdot A}, \quad (5)$$

式中,  $B$  为自适应衰减指数,其包含有雾图像的大气光值与其暗通道值的差值信息,取值范围为  $[0, +\infty)$ 。 $\hat{J}^{\text{dark}}$  为无雾图像的估计暗通道。 $B$  值越大,  $\hat{J}^{\text{dark}}$  向 0 衰减越迅速;反之,则  $\hat{J}^{\text{dark}}$  与  $I^{\text{dark}}$  接近。通过实验测试发现,  $B$  的取值基本分布于  $[0, 5]$  之间,当  $B$  的取值超出 5 以后,  $\hat{J}^{\text{dark}}$  基本衰减至 0。

### 3.3 自适应权重能量函数

上述模型修正了暗通道先验理论在明亮区域的缺陷,但由于指数映射模型对输入图像中的噪声有极高的敏感性,所得透射率估计值会在部分区域出现跳变,因此需要对估计透射率进行平滑优化。对于自然图像,其像素分布具有马尔可夫性,即某处像素值与其邻域像素值有关。像素点在 4 邻域内能构成一个简单的马尔可夫网,中心像素点  $x_1$  与邻域内像素点  $x_2, x_3, x_4$  和  $x_5$  构成  $\{x_1, x_2\}, \{x_1, x_3\}, \{x_1, x_4\}$  和  $\{x_1, x_5\}$  4 个极大团,其余像素点互为独立无关点。利用上述特性可以对图像进行平滑,因此提出一种自适应权重能量函数对透射率进行优化。对有雾图像,可通过对后验概率  $P(J, t|I)$  最大化进行求解<sup>[12]</sup>。根据贝叶斯公式得

$$P(J, t|I) \propto P(I|J, t) \cdot P(J) \cdot P(t), \quad (7)$$

对式(7)两边取对数,构建能量函数:

$$E(J, t|I) = E(I|J, t) + E(J) + E(t), \quad (8)$$

式中:  $E(I|J, t)$  为数据项;  $E(J)$  与  $E(t)$  为先验项。根据式(1),数据项定义为

$$E(I|J, t) = \sum_{(i,j) \in X} \|J(i,j)t(i,j) + A(i,j)[1 - t(i,j)] - I(i,j)\|_2^2, \quad (9)$$

式中,  $X$  为输入图像的像素位置, 数据项使用  $L_2$  范数正则化。

先验项按照 4 邻域内的马尔可夫网构建。根据马尔可夫随机场理论, 其分布函数与吉布斯分布具有一致性, 因此构造先验项  $E(J)$  为

$$E(J) = \sum_{(i,j) \in X} F \sum_{(k,l) \in \delta} \|J(i,j) - J(i+k, j+l)\|_{1/2}, \quad (10)$$

$$F = \exp(-|\nabla I|), \quad (11)$$

式中:  $\delta$  为像素点的 4 邻域;  $F$  为自适应权重函数, 由于图像在梯度较大的区域通常包含景深突变以及景物轮廓信息, 为保证图像信息的完整性, 提出利用有雾图像的梯度作为权重函数的参量,  $\nabla I$  为有雾图像的梯度。图像梯度较大处,  $E(J)$  项对能量函数影响较小, 图像边缘信息被保留, 反之亦然。根据实验测试, 该自适应权重能明显减少噪声及细小纹理对透射率的影响。为使先验项具有理想的稀疏性特征, 根据文献 [16] 提出的  $L_{1/2}$  正则子的最稀疏性和最稳健性, 对先验项中的平滑部分均采用  $L_{1/2}$  范数正则化。

先验项  $E(t)$  使用两个约束条件进行约束: 1) 邻域内像素之间透射率  $t$  的相关性; 2) 透射率  $t$  与初始透射率估计值  $t'$  之间的误差。构造先验项  $E(t)$  为

$$E(t) = \sum_{(i,j) \in X} F \sum_{(k,l) \in \delta} \|t(i,j) - t(i+k, j+l)\|_{1/2} + \lambda \sum_{(i,j) \in X} \|t(i,j) - t'(i,j)\|_2^2, \quad (12)$$

式中: 第一项为平滑项; 第二项为误差项;  $\lambda$  为误差项的权重系数;  $F$  为与  $E(J)$  项相同的自适应权重函数;  $t'$  为式(7)所得初始透射率估计值。

### 3.4 最优化求解

对式(8)求解能量最小即可获得相应复原图像及透射率最优解。为减少优化算法运算量, 提高处理速度, 使用降采样方法减小输入图像尺寸, 并转化为灰度图像执行, 获得透射率最优解后再插值恢复为原尺寸图像。式(8)中包含  $J, t$  两部分未知参量, 可采用交替迭代方法, 将式(8)分为两部分分别求解:

$$E(J, t|I)_J = E(I|J, t) + E(J), \quad (13)$$

$$E(J, t|I)_t = E(I|J, t) + E(t), \quad (14)$$

对式(13)求解时, 将  $t$  作为已知项, 求出  $J$  的最优解; 对式(14)求解时, 将  $J$  的最优解作为已知项, 求出  $t$

的最优解。如此交替迭代, 使两式均获得最优解。该能量函数求解属于无约束优化问题, 采用 RMSProp 梯度下降算法进行求解。算法流程如图 5 所示。

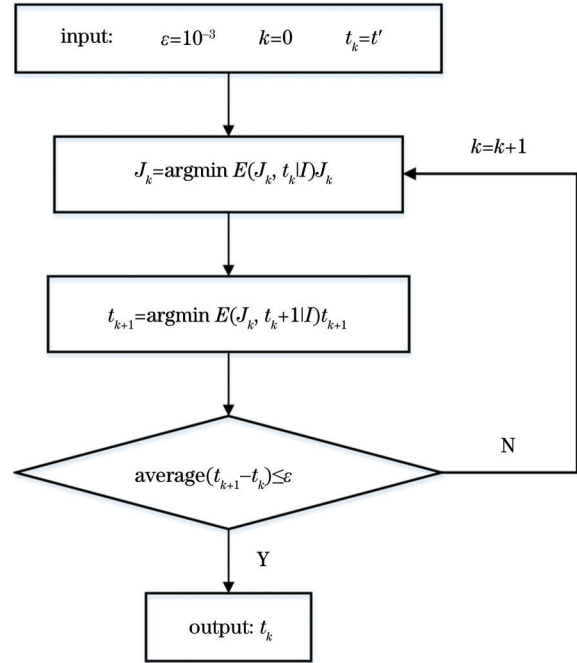


图 5 优化方法流程图

Fig. 5 Flowchart of optimization method

### 3.5 图像复原

将透射率最优解  $t_k$  及大气光值  $A$  代入大气散射模型获得最终复原图像。根据式(1)可得

$$J(x) = \frac{I(x) - A}{\max(t_k(x), t_0)} + A, \quad (15)$$

式中,  $t_0$  为防止分母项趋近于 0 所设的下限, 设为 0.01。

## 4 实验结果与分析

实验均在 Intel(R) Core(TM) i5-3210M CPU @2.50 GHz, 4.0 GB RAM 的硬件环境下运行。为了对算法的可行性与有效性进行评估, 拟从主观视觉效果以及图像客观质量评估两方面, 将所提算法与其他去雾算法进行实验对比。

### 4.1 主观视觉效果

视觉分析能直观反映出图像复原效果, 选取去雾领域中具有代表性的文献 [3]、[4]、[13]、[14]、[11]、[17] 的方法进行对比, 对比结果如图 6 所示。

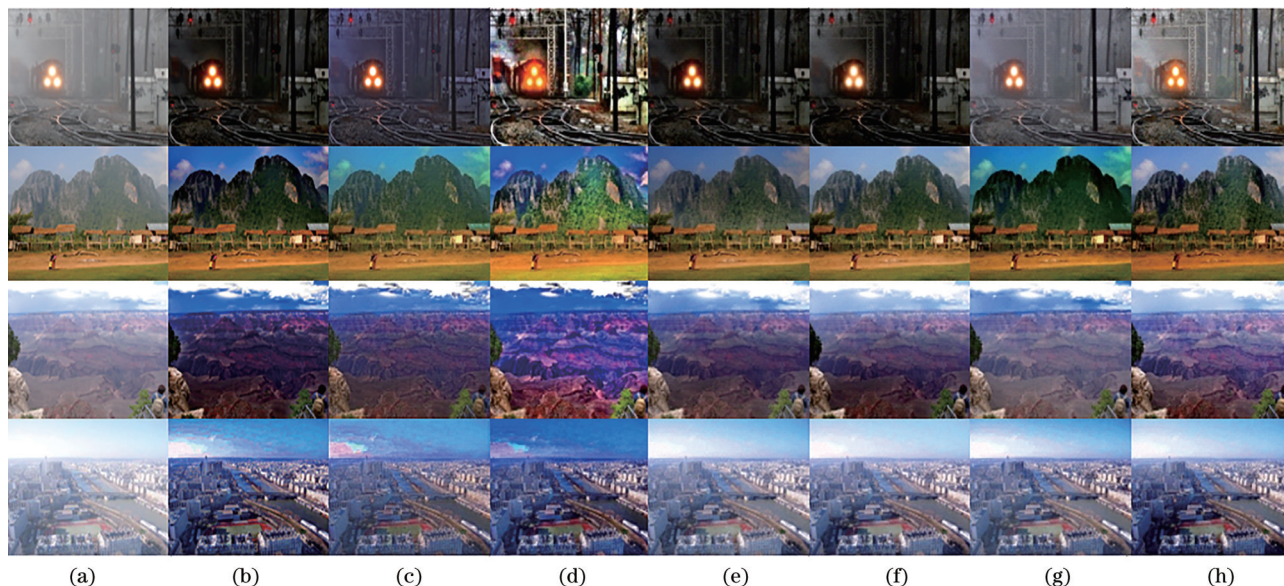


图6 实验效果对比。(a)雾图;(b)文献[3]方法;(c)文献[4]方法;(d)文献[11]方法;(e)文献[17]方法;(f)文献[13]方法;(g)文献[14]方法;(h)本文方法

Fig. 6 Comparison of experimental effects. (a) Hazy image; (b) method of Ref. [3]; (c) method of Ref. [4]; (d) method of Ref. [11]; (e) method of Ref. [17]; (f) method of Ref. [13]; (g) method of Ref. [14]; (h) proposed method

图6(b)为文献[3]方法去雾效果,可以观察到该方法复原的图像雾气去除的效果比较明显,但导向滤波的使用导致图像在景深突变的边缘区域出现光晕效应,并且图像整体亮度偏暗,视觉效果有限;图6(c)为文献[4]方法去雾效果,该方法复原的图像中纹理细节明显增多,表明该方法的细节恢复效果有优势,但复原图像有明显偏色现象且出现伪影;图6(d)为文献[11]方法去雾效果,该方法恢复的图像虽然亮度高,但色彩严重失真,过度饱和;图6(e)为文献[17]方法去雾效果,该方法复原的图像相对自然,但其远景部分去雾不彻底,细节信息恢复有限,并且亮度偏暗;图6(f)为文献[13]方法去雾效果,该方法在天空等明亮区域复原效果良好,但在原图亮度较低的区域复原结果过于暗淡;图6(g)为文献[14]方法去雾效果,该方法出现过饱和与偏色现象;图6(h)为本文所提算法实现的去雾效果,从图中可以看出,复原的图像细节丰富,亮度适宜,图像整体比较自然,未出现偏色失真的现象。相比文献[3]和文献[17]方法,本文方法复原图像细节多,远近景均有较好的去雾效果,且图像明亮度较高;相比文献[4]和文献[11]方法,本文方法的色彩保真能力强,无偏色和伪影,复原效果自然;相比文献[13]和文献[14]的机器学习方法,本文方法对高亮区域的复原效果优于文献[14]方法,色彩饱和度及亮度优于文献[13]方法。综上所述,本文方

法在视觉效果上取得了一定的成果,复原图像色彩保真度高、亮度适宜。

#### 4.2 客观质量评价

主观视觉评价具有一定的局限性,必须采用客观评价进行说明,分别使用无参考和全参考评价指标进行复原质量评估,其中无参考指标用于评判没有对应清晰图像的真实雾图复原的质量优劣,全参考指标则用于评判有对应清晰图像的合成雾图复原的质量优劣。根据文献[18],对于真实雾图复原效果本文采用新增可见边之比( $e$ )和可见边归一化平均梯度( $r$ )分析图像增加纹理信息和可见度提升的程度,纹理信息增加越多,图像的细节信息恢复越好;采用直方图相关系数(HCC)分析图像色彩保真程度,HCC越高则图像色彩偏移越小,图像越自然。对于合成雾图复原效果本文采用结构相似性(SSIM)和峰值信噪比(PSNR)量化复原图像与对应清晰图像之间的相似程度,以此评价去雾算法恢复图像的能力。运行时间(Time)则用于反映去雾算法的平均运行时间。分别选取10幅包含高亮和天空区域的真实雾图和合成雾图进行实验,对比结果采用所得指标平均值,如表1所示。

根据表1中指标可以看出,在无参考评价指标方面,本文算法取得了最高的 $r$ 和HCC指标,相比于对比算法的平均表现(各对比算法取得的相同指标的平均值), $r$ 和HCC分别高出19.3%和67.3%,

表 1 客观评价指标

Table 1 Objective evaluation index

Name	$e$	$r$	HCC	Time /s	SSIM	PSNR
Ref. [3]	10.959	1.616	0.1699	2.766	0.5607	16.4815
Ref. [17]	11.035	1.564	0.2420	1.607	0.7982	16.7393
Ref. [4]	14.125	1.942	0.2296	4.040	0.7480	15.7026
Ref. [11]	21.943	1.763	0.2551	3.601	0.5130	14.6643
Ref. [13]	15.461	1.679	0.3141	4.437	0.7386	18.6626
Ref. [14]	12.504	1.348	0.4108	5.160	0.8522	18.8265
Proposed method	19.846	1.972	0.4521	3.495	0.8907	19.3273

表明本文算法在图像可见度和色彩保真方面有较好的效果; $e$ 虽略低于文献[11]算法,但明显高于其他对比算法,较平均表现高出 38.4%。在全参考评价指标方面,本文算法的 SSIM 和 PSNR 指标均取得了最高值,较平均表现分别高出 26.9% 和 14.7%,表明本文算法有较强的图像恢复能力。综合考虑,本文算法表现出了一定的可靠性与有效性。

## 5 结 论

针对现有去雾算法在明亮区域复原效果不足的问题,提出一种基于指数映射与自适应权重能量函数的单幅图像去雾方法。该方法的优势在于通过对自然图像的统计规律进行分析,并结合指数函数衰减特性,构造了新的透射率估计模型,可以对包含明亮区域或天空区域的有雾图像进行有效处理;同时基于马尔可夫网,构造出自适应权重能量函数,能有效地对透射率进行优化。根据实验测试结果,该算法具有可行性与有效性,泛化处理能力强,复原图像清晰、亮度适宜,主观视觉效果和客观评价指标方面都有良好的表现。由于采用了迭代优化方法,算法运行时间较长,虽然采用了降采样方法提高算法运行速度,但提升有限,因此在运行时间上该算法未占据明显优势,这也是接下来的改进方向。

## 参 考 文 献

- [1] 梅康, 刘小勤, 沐超, 等. 基于自适应指数加权移动平均滤波的快速去雾算法[J]. 中国激光, 2020, 47(1): 0109001.  
Mei K, Liu X Q, Mu C, et al. Fast defogging algorithm based on adaptive exponentially weighted moving average filtering[J]. Chinese Journal of Lasers,

2020, 47(1): 0109001.

- [2] 刘增力, 付钰. 基于透射率自适应约束修正的图像去雾算法[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(16): 161003.  
Liu Z L, Fu Y. Image dehazing algorithm based on adaptive constraint correction of transmittance[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(16): 161003.
- [3] 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.
- [4] Meng G F, Wang Y, Duan J Y, et al. Efficient image dehazing with boundary constraint and contextual regularization[C]//2013 IEEE International Conference on Computer Vision, December 1-8, 2013, Sydney, NSW, Australia. New York: IEEE Press, 2013: 617-624.
- [5] Shu Q L, Wu C S, Zhong Q X, et al. Alternating minimization algorithm for hybrid regularized variational image dehazing[J]. Optik, 2019, 185: 943-956.
- [6] Gao Y, Su Y J, Li Q M, et al. Single image dehazing via self-constructing image fusion[J]. Signal Processing, 2020, 167: 107284.
- [7] 陈永, 卢晨涛. 基于超像素分割和暗亮通道结合的单幅图像去雾[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(16): 161023.  
Chen Y, Lu C T. Single image dehazing based on superpixel segmentation combined with dark-bright channels[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(16): 161023.
- [8] Narasimhan S G, Nayar S K. Chromatic framework for vision in bad weather[C]//Proceedings IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, June 15, 2000, Hilton Head, SC, USA. New York: IEEE Press, 2000: 598-605.
- [9] Sulami M, Glatzer I, Fattal R, et al. Automatic recovery of the atmospheric light in hazy images[C]//2014 IEEE International Conference on Computational Photography, May 2-4, 2014, Santa Clara, CA, USA. New York: IEEE Press, 2014: 14383045.
- [10] Fattal R. Single image dehazing[J]. ACM Transactions on Graphics, 2008, 27(3): 1-9.
- [11] 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: 371-383.
- [12] Tan R T. Visibility in bad weather from a single

- image[C]//2008 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, June 23-28, 2008, Anchorage, AK, USA. New York: IEEE Press, 2008: 10139948.
- [13] Cai B L, Xu X M, Jia K, et al. DehazeNet: an end-to-end system for single image haze removal[J]. IEEE Transactions on Image Processing: a Publication of the IEEE Signal Processing Society, 2016, 25(11): 5187-5198.
- [14] Ren W Q, Liu S, Zhang H, et al. Single image dehazing via multi-scale convolutional neural networks [M]//Leibe B, Matas J, Sebe N, et al. Computer vision-ECCV 2016. Lecture notes in computer science. Cham: Springer, 2016, 9906: 154-169.
- [15] Hodges C, Bennamoun M, Rahmani H. Single image dehazing using deep neural networks[J]. Pattern Recognition Letters, 2019, 128: 70-77.
- [16] Xu Z B, Guo H L, Wang Y, et al. Representative of  $L_{1/2}$  regularization among  $L_q$  ( $0 < q \leq 1$ ) regularizations: an experimental study based on phase diagram[J]. Acta Automatica Sinica, 2012, 38(7): 1225-1228.
- [17] 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.
- [18] Xu Y, Wen J, Fei L K, et al. Review of video and image defogging algorithms and related studies on image restoration and enhancement[J]. IEEE Access, 2016, 4: 165-188.