

基于均值不等关系优化的自适应图像去雾算法

杨燕* 王志伟

(兰州交通大学电子与信息工程学院 兰州 730070)

摘要: 针对暗通道先验去雾算法的不足,如天空区域透射率估计过小和在景深突变处易发生光晕效应,该文提出一种新颖且高效的去雾算法。首先通过几何分析建立雾图对应无雾图像暗通道图的平面扇形模型,然后设定一种新型的高斯均值函数,对其标准差进行自适应处理,用以估计扇形模型的上下边界值,通过引入均值不等关系对两侧边界进行逼近,拟合出最优无雾图像暗通道图,进一步求得最佳透射率,同时也改进局部大气光的探索方法并复原出最终结果。实验表明,与其它一些经典算法相比较,所提算法能广泛适用于各类图像,去雾程度彻底且效果清晰自然,具有较低的时间复杂度,有利于实时处理。

关键词: 图像复原; 去雾; 暗通道先验; 透射率; 大气散射模型

中图分类号: TN911.73; TP391.41

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2020)03-0755-09

DOI: 10.11999/JEIT190368

Adaptive Image Dehazing Algorithm Based on Mean Unequal Relation Optimization

YANG Yan WANG Zhiwei

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

Abstract: In view of shortcomings of dark channel prior dehazing methods, such as transmission in sky areas is small and halo effects are prone to occur in the edges, this paper proposes a novel and efficient dehazing algorithm. Firstly, the fan-shaped model with dark channel map of haze-free image is established by geometric analysis. Then a new Gaussian mean function is set to estimate the boundary values of the model and its standard deviation is adaptive processing. Mean-value unequal relationship is also introduced to approximate the two-sided boundary, which is used to fit the most excellent dark channel map of haze-free, further obtains the best transmission. At the same time the local atmospheric light is improved to recover the final result. Experimental results show that the proposed method can be widely applied to all kinds of images compared with other classical algorithms. The degree of dehazing is thorough, final result is clear and natural. More importantly, it is favorable for real-time processing that has low time complexity.

Key words: Image restoration; Dehazing; Dark Channel Prior (DCP); Transmission; Atmospheric scattering model

1 引言

在不良天气情况下,由于空气中介质粒子如雾、霾或沙尘的存在,很容易导致成像设备在成像过程中发生散射或折射,从而得到降质的图像或视

频。而在现实生活中,大多数成像系统都需要准确、清晰地捕获图像特征。因此,对在不佳天气情况下获得的图像进行清晰化处理有着重要的研究意义和应用价值。

从目前的研究现状而言,图像去雾的方法主要分为基于图像增强,图像复原和机器学习3类。在早期的研究中,最常用的方法是基于图像增强,代表性算法有直方图均衡^[1],小波变换^[2]和Retinex^[3]等。但是,此类算法并没有仔细研究图像降质的根本原因,也没有针对雾气建立特定的模型,只是进行简单的清晰处理,增强直观感受。严格意义上讲,根本不属于图像去雾算法。

近些年来,基于图像复原的去雾算法得到了研

收稿日期: 2019-05-22; 改回日期: 2019-10-29; 网络出版: 2019-11-12

*通信作者: 杨燕 yangyantd@mail.lzjtu.cn

基金项目: 国家自然科学基金(61561030), 甘肃省财政厅基本科研业务费基金(214138), 兰州交通大学教改基金(160012)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61561030), The Fundamental Research Funds for the Gansu Provincial Finance Department (214138), The Research Fund of Teaching Reform Project of Lanzhou Jiao Tong University (160012)

究者的重视,通过建立物理模型反演退化过程,并结合景深信息或者先验条件,得到最优复原结果。Schechner等人^[4]在成像设备前放置偏振片估计景深信息,利用大气光的偏振特性进行去雾。Narasimhan等人^[5]提出了多尺度去雾算法,即在不同天气情况下对同一场景进行多次拍摄,通过比较分析得到处理结果。这些方法虽然能有效去除雾气,但是实施条件或者流程都太过复杂,不利于实际应用,因此针对单幅图像的去雾算法得到了快速的发展。Tan^[6]观察出无雾图像的对比度高于有雾图像,并利用MRF(Markov Random Field)建立模型进行去雾,该方法能够取得较好的结果,但是容易失真。Fattal^[7]使用独立成分分析(ICA)法来进行处理,但是耗时太长且不能应用于灰度图像。Tarel等人^[8]提出了基于中值滤波的去雾算法,具有较快的运行速度,但是算法参数多不易调整。He等人^[9]基于大量的统计信息,首次提出了暗通道先验理论(DCP),该算法取得了突破性的成果,但是引入软抠图算法耗时长,不适于实时处理。Zhu等人^[10]通过机器学习方法提出了颜色衰减先验(CAP),指出了图像景深信息与其亮度和饱和度之间的关系,但是去雾程度不彻底。Meng等人^[11]提出以边界约束来限制透射率的范围,并用正则法优化的去雾方法,但复原结果过饱和且存在偏色问题。

最近,也有很多基于机器学习或者深度学习的去雾算法被提出来。Cai等人^[12]提出了一种基于端对端的神经网络架构来训练透射率,并采用窗口过度方法来优化,进而恢复出无雾图像。Ren等人^[13]使用多尺度卷积神经网络处理雾图以获得复原结果。虽然机器学习和深度学习具有很强的技术前沿性,但是由于没有专门针对雾天图像的超大量训练库以及更深层次的网络结构,并不总能取得最佳和稳定的效果,导致其在图像去雾领域的发展受到了限制。

针对现有方法的不足之处,本文提出了一种新颖且高效的图像去雾算法。首先将常规方法中所见的3维模型通过简化映射,建立起特定的扇形模型,对无雾图像的暗通道图进行环形预估计;进而又设定一种新的高斯均值函数用来估计环形区域的最小和最大值,对高斯函数的标准差进行自适应处理;最后通过引入的均值不等关系进行逼近拟合,得到最佳的无雾图像暗通道图,并结合大气散射模型得到最优的透射率,同时也改进了获取局部大气光的方法,最终复原出无雾图像。实验结果证明,本文所提算法去雾彻底,色彩保持较好,并且具有较快的运算速度。

2 背景

2.1 大气散射模型

在计算机视觉分析里,用于描述雾天成型机制的模型^[14]如式(1)所示

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

其中, $I(x)$ 表示有雾图像, $J(x)$ 表示无雾图像, $t(x)$ 表示传输透射率, A 代表大气光值。 $J(x)t(x)$ 叫做直接衰减项,它表示入射光直接穿过空气受到介质粒子发生散射的衰减程度。 $A(1 - t(x))$ 称为附加项,表示在成像过程中加入的大气光,主要来源为直射的阳光、大气散射光和地面反射光等。当空气中的介质粒子分布均匀时, $t(x)$ 可表示为

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

$d(x)$ 表示景深信息,即场景到成像设备的距离, β 表示大气散射系数。

2.2 暗通道先验理论

暗通道先验算法^[9]是目前最具有代表性的去雾算法。He等人通过观察大量户外无雾图像得出结论:除去天空的大部分区域,像素值至少在一个颜色通道的最小值趋近于0。

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

其中, $\Omega(x)$ 是以像素 x 为中心的局部窗口, c 指的是3个颜色通道即r, g, b, J^{dark} 被称为暗通道图。结合大气散射模型可以得到透射率 $t(x)$

$$\frac{I^{\text{dark}}(x)}{A} = t(x) \frac{J^{\text{dark}}(x)}{A} + 1 - t(x) \quad (4)$$

$$t(x) = 1 - w \frac{I^{\text{dark}}(x)}{A} \quad (5)$$

因为雾气一旦被完全去除,复原的效果会不自然,所以 w 的作用是为了保留适量雾气,通常 $w = 0.95$ 。利用式(5)求得透射率比较粗糙,不够精确,直接用于复原会产生明显的光晕效应,因此,He等人使用了软抠图算法进行优化,虽然取得了不错的效果,但是运算和时间复杂度略高。随后He等人又提出了引导滤波算法^[15]代替软抠图,在保持较好去雾效果的同时缩短了运行时间。

3 本文算法

3.1 扇形模型

在有关大气散射模型的几何描述中,最常见的3维分析如图1(a)所示,即3个向量 A^C, I^C, J^C 共平面且 $\|A^C\| > \|I^C\| > \|J^C\|$ 。为了得到更加清晰的几何关系,本文将3维空间映射到2维平面,以圆弧规划边界,建立起如图1(b)所示的平面模型,坐标

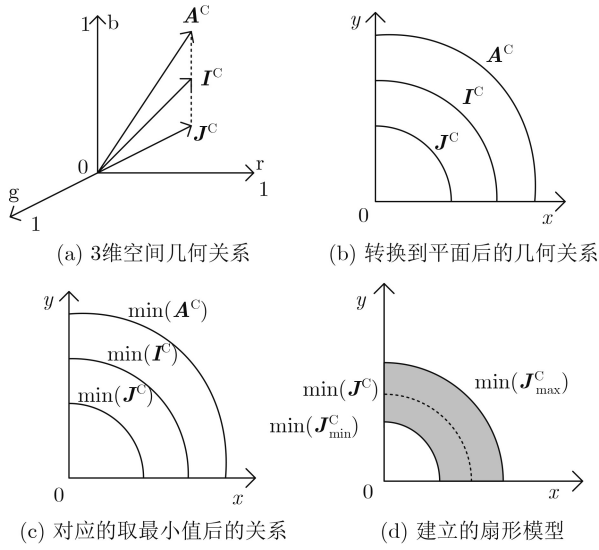


图1 3个向量的几何表示

轴表示像素强度，在此模型中原有的基本结论保持不变。进一步对3个向量求取最小值后仍然满足此几何关系，如图1(c)所示。针对暗通道先验不适于处理天空区域的不足，本文结合式(1)和式(3)得到式(6)的透射率计算形式

$$t(x) = \frac{A^C - \min(I^C(x))}{A^C - \min(J^C(x))} \quad (6)$$

该计算形式系统的包含了所有区域，即暗通道善于处理的非天空区域和失效的天空区域。根据其计算形式，本文对 $\min(J^C)$ 进行范围约束，采用边界最值限定，建立扇形模型如图1(d)所示，可知最优 $\min(J^C)$ 值在灰色区域内。

3.2 边界逼近

对 $\min(J^C)$ 的最优估计只能从唯一的已知量即原图 $I^C(x)$ 出发，根据所建模型，对 $I^C(x)$ 分别进行求取 $\min(I^C_{\min}(x))$, $\min(I^C_{\max}(x))$ 和 $\min(I^C(x))$ 的操作，以便和图1(d)相匹配。因为 $\min(I^C_{\min}(x))$ 恰为雾图的暗通道图，对应本文设定 $\min(I^C_{\max}(x))$ 为原图的亮通道图，匹配关系如图2所示。因为 $\|A^C\| > \|I^C\| > \|J^C\|$ ，所以假设存在一种衰减关系 ρ ，有

$$J^C(x) = \rho(I^C(x)) \quad (7)$$

$$\left. \begin{aligned} \min(J^C_{\min}(x)) &= \rho(\min(I^C_{\min}(x))) \\ \min(J^C_{\max}(x)) &= \rho(\min(I^C_{\max}(x))) \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

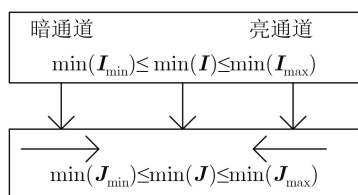


图2 各个向量间的匹配关系

根据式(8)可以得到图1(d)灰色区域的边界估计，并进一步寻求最优解 $\min(J^C)$ 。

3.3 高斯均值函数

高斯函数具有良好的分布和衰减特性，为了能得到更加精确的衰减关系 ρ ，本文设定了一种新型的衰减函数即高斯均值函数。将其均值设为0且幅值进行归一化处理得到函数 $G(0, \sigma)$ ， σ 为标准差。针对不同雾图，为了能够具有自适应处理的功能，本文算法对 σ 进行了如式(10)的规定

$$G = \exp\left(\frac{-x^2}{2\sigma^2}\right) \quad (9)$$

$$\left. \begin{aligned} \rho_1 &= G(0, \sigma_1) = G\left(0, \frac{a+b}{2}\right) \\ \rho_2 &= G(0, \sigma_2) = G\left(0, \frac{2ab}{a+b}\right) \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

其中， σ_1 和 σ_2 为不同的标准差，且 $\sigma_1 > \sigma_2$ ，其函数曲线图如图3所示。

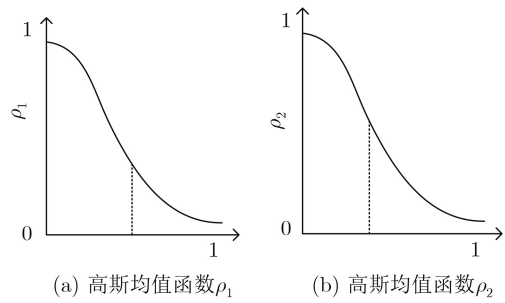


图3 高斯均值函数

因大部分有雾图像的亮度值整体偏高，以 mean 为阈值将图像划分为低亮度和高亮度区域，设定 a 和 b 分别作为两个区域的特征值， $a, b \in (0, 1)$ 。

$$\left. \begin{aligned} a &= \frac{\text{mean} - \min(\min(I))}{2} \\ b &= \frac{\max(\max(I)) - \text{mean}}{2} \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

可以发现，式(10)的 σ 是采用均值计算的形式，关于其缘由和特性，进行如下详细描述。

在数学理论知识当中，有关数据的均值存在不等关系式(12)

$$A \geq G \geq H \quad (12)$$

$$\left. \begin{aligned} A &= \frac{a+b}{2} \\ G &= \sqrt{ab} \\ H &= \frac{2ab}{a+b} \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

其中 A 为算术均值， G 为几何均值， H 为调和均值。均值不等式的引入，简化了求区域内最优解的

过程,且不涉及大规模计算和优化迭代的过程,以一种精妙的缩放形式来进行估值,为求取逼近值提供了极大的便利。本文最重要的步骤就是要求取扇形区域内的最优解 $\min(\mathbf{J}^C)$,采用不等式形式进行逼近。在扇形区域中,下边界 $\min(\mathbf{I}_{\min}^C(x))$ 具有较小的值,为了防止处理结果溢出,采用较为平缓的衰减 ρ_1 进行估值;同理用稍剧烈的 ρ_2 处理上边界 $\min(\mathbf{I}_{\max}^C(x))$,得到扇形区域两侧边界的估计值。

$$\left. \begin{aligned} \min(\mathbf{J}_{\min}^C(x)) &= \rho_1(\min(\mathbf{I}_{\min}^C(x))) \\ \min(\mathbf{J}_{\max}^C(x)) &= \rho_2(\min(\mathbf{I}_{\max}^C(x))) \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

3.4 透射率估计

在得到边界的估计值 $\min(\mathbf{J}_{\min}^C(x))$ 和 $\min(\mathbf{J}_{\max}^C(x))$ 后,依式(12)所示不等关系,采用几何均值逼近从而拟合得到最佳的 $\min(\mathbf{J}^C)$ 如式(15)所示

$$\min(\mathbf{J}^C) = \sqrt{\min(\mathbf{J}_{\min}^C(x)) \cdot \min(\mathbf{J}_{\max}^C(x))} \quad (15)$$

进而根据式(6)得到本文透射率 $t(x)$ 。

以图4为例,分别求取He算法^[9],Meng算法^[11],Cai算法^[12]对应的透射率和去雾结果。通过对比发现:本文的透射率细节更加丰富如图4(e)所示。因为得到了更加精确的透射率,所以复原结果不存在失真和过饱和现象(框内部分),效果良好且自然如图4(i)所示。

3.5 局部大气光

去雾算法里另一个重要的参数就是大气光值 \mathbf{A}^C ,反映了图像的亮度信息。当估值过大时,复

原的结果将会偏暗,反之亦然。He等人^[9]选取了在暗通道图中排名前0.1%的像素值作为大气光值,大多数情况下较为准确,但是含有高亮物体时会高估。Cai等人^[12]则选取了雾图中最大像素值作为大气光值。Sun等人^[16]提出了局部大气光探索方法,减弱了全局估计带来的误差。首先,得到图像的3个颜色通道的最大值 $\mathbf{A}_{\max}^c(x) = \max_{c \in \{r,g,b\}} \mathbf{I}^c(x)$;其次通过形态学闭操作来消除图像内部高亮细节干扰,闭操作采用的滤波核大小为 $r = \min[w, h]/10$, w 和 h 为图像的尺寸;最后利用交叉双边滤波进行平滑处理得到 \mathbf{A}^c 。虽然Sun算法的大气光值精度要高于He算法,但是存在的问题是在形态学操作中滤波核选取太过单一。当滤波核的尺寸过小时,可能会丢失掉部分信息,过大时,可能会包含无用噪声。针对这一不足,本文进行如表1方法的改进。

先后选取了两次滤波核尺寸,克服了单一尺寸的不足,对比如图5(b)和图5(c)所示,可以发现改进后大气光定位更加准确。

从去雾效果而言,He算法^[9]和Cai算法^[12]由于采用固定的大气光探索方法,高估了大气光值,造成复原结果偏暗;与之相比,Sun等人^[16]采用局部大气光估计得到的结果亮度提升。本文算法在Sun等人的基础上进行改进,亮度更加适宜,也符合视觉特性。

3.6 复原结果

根据式(1),并结合所求 $\mathbf{A}^c(x)$ 和 $t(x)$ 来复原最终结果。为了避免 $t(x) \rightarrow 0$ 时而导致最终复原结果

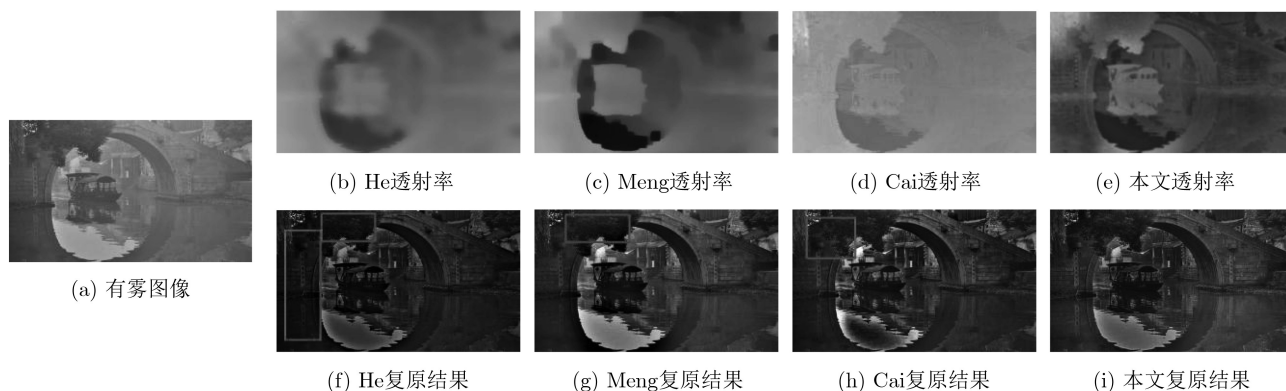


图4 透射率及效果对比图

表1 改进的大气光探索方法

输入: 有雾图像 $\mathbf{I}^c(x)$;

步骤1 找出有雾图像的3颜色通道的最大值 $\mathbf{A}_{\max}^c(x) = \max_{c \in \{r,g,b\}} \mathbf{I}^c(x)$

步骤2 进行形态学闭操作,滤波核尺寸分别为 $r_1 = \min[w, h]/5$, $r_2 = \min[w, h]/20$,得到两次闭操作结果 s_1 和 s_2 ;

步骤3 求取两次闭操作的平均值, $s = (s_1 + s_2)/2$;

步骤4 进行交叉滤波平滑处理,得到最后的结果 \mathbf{A}^c 。

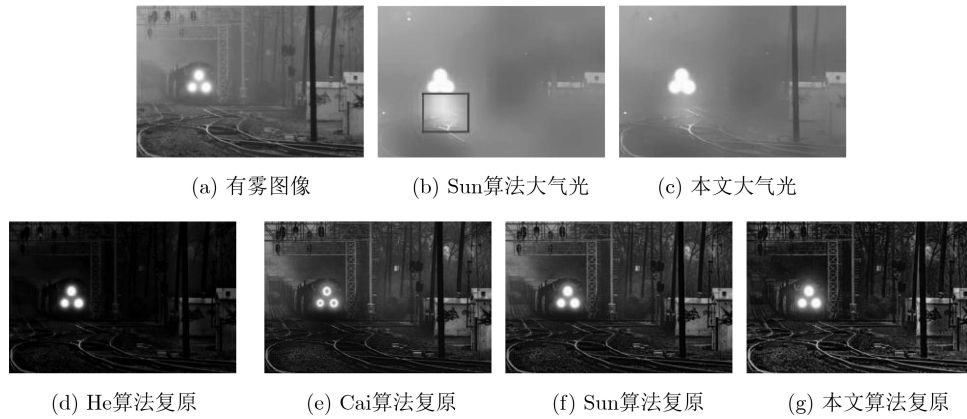


图5 大气光值及效果对比图

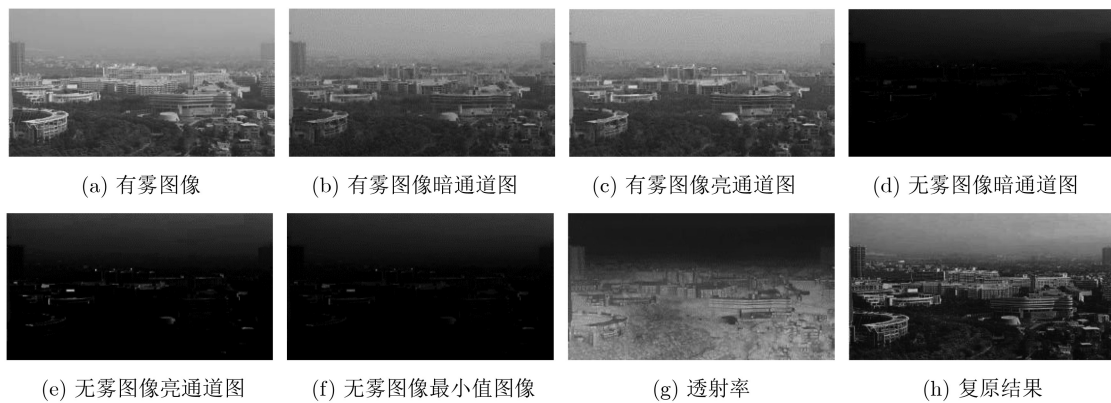


图6 去雾示意图

溢出，对 $t(x)$ 进行最小值限制，设定下限值 $t_0 = 0.1$ ，最终复原的公式为

$$J^c(x) = \frac{I^c(x) - A^c}{\max(t(x), t_0)} + A^c \quad (16)$$

本文算法的去雾示意图如图6所示，原理框图如图7所示。

4 实验结果

为证实所提算法的可行性和有效性，从主观和

客观两个方面进行实验评价。主观方面，将本文算法所得到的结果与一些经典算法对比，在视觉效果上直接对复原图像进行分析，实验环境为Matlab (R2016a)，运行系统为Windows 7。由于主观评价具有片面性，因此也采用客观评价，从侧面辅助验证。

4.1 主观评价

为了进行更加细致的评测，本文挑选了8幅常见的有雾图像，将其分为3组分别是近景组，远近

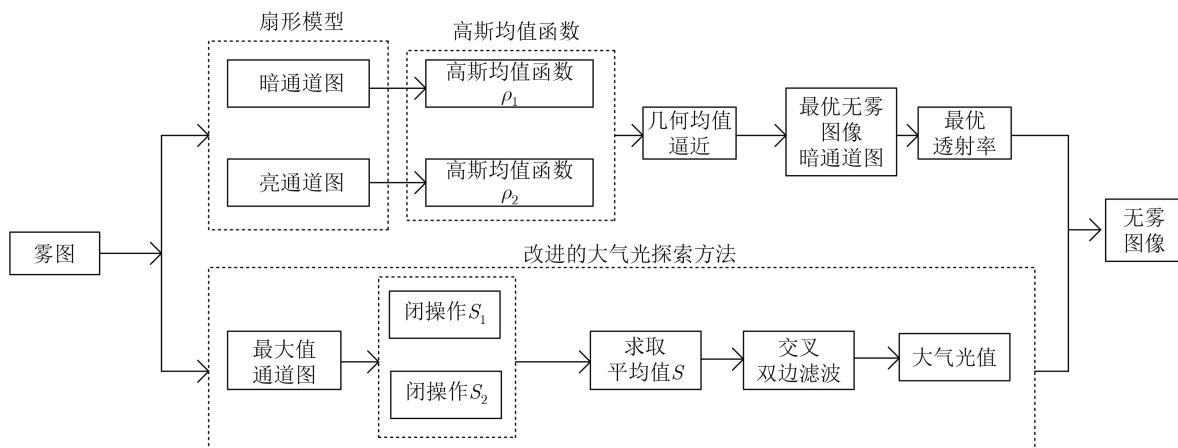


图7 本文算法原理框图

交替组和远景组图像,选取3种去雾领域中的代表性算法:He算法^[9],Meng算法^[11],Ren算法^[13],从复原的细节和效果进行分析。虽然主观评价具有一定的片面性,但可以快速判断出复原效果的好坏。图8是一组近景特性丰富的图片,可以看出:He算法恢复的细节较多,去雾的效果较为良好,但是在边缘处存在明显的光晕效应,并且在近景处颜色偏暗,这是由于大气光值不精确所引起的,如图8(b)所示;Meng算法通过添加约束条件来限制透射率的范围,效果细节增多,但是同时也牺牲了色彩信息,导致复原结果存在偏色现象如图8(c)所示;Ren算法使用了多尺度卷积神经网络,基本消除了雾气的影响,但是存在很明显的颜色失真和近景过饱和问题如图8(d)所示;图9是一组远近景都存在

的图像,可以看出:He算法在近景处的颜色偏暗,并且在天空区域有部分失真,这是由于天空区域的透射率不满足暗通道先验规律所导致的,如图9(b)所示;Meng算法得到的结果去雾较彻底,但是由于增加约束条件的同时引入了部分干扰信息和噪声如图9(c)所示;Ren算法在近景处发生失真现象,并且对天空区域的雾气去除效果较差如图9(d)所示;图10是一组远景图像,可以看出:He算法整体处理效果较好,但是对于部分图像处理后仍有朦胧的雾感如图10(b)所示;Meng算法和Ren算法都存在偏色问题并且部分区域失真如图10(c)和图10(d)所示。

综合比较发现:本文算法恢复的细节明显增多,极好地保持了原图的远近景特性,没有明显的

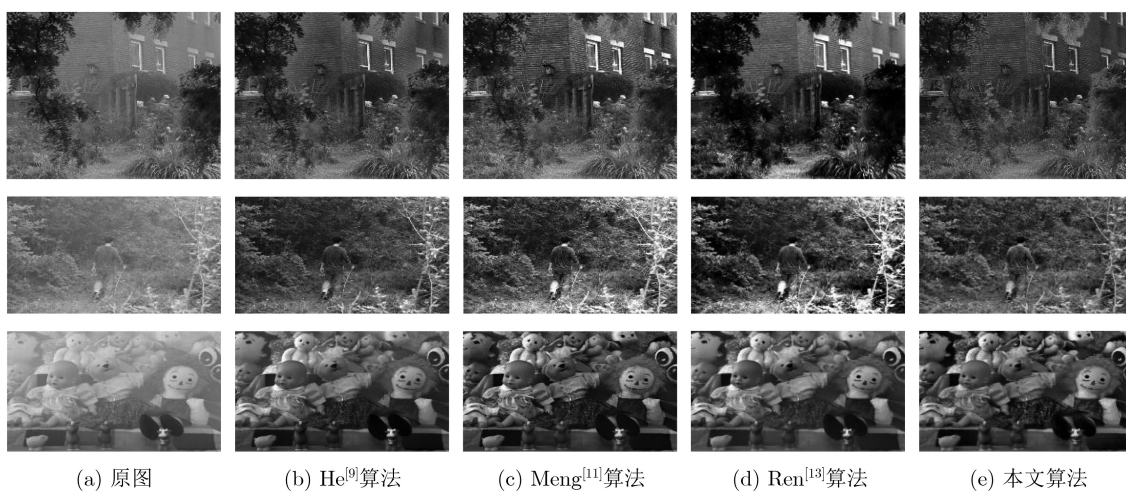


图8 近景组图像(图像1-图像3)

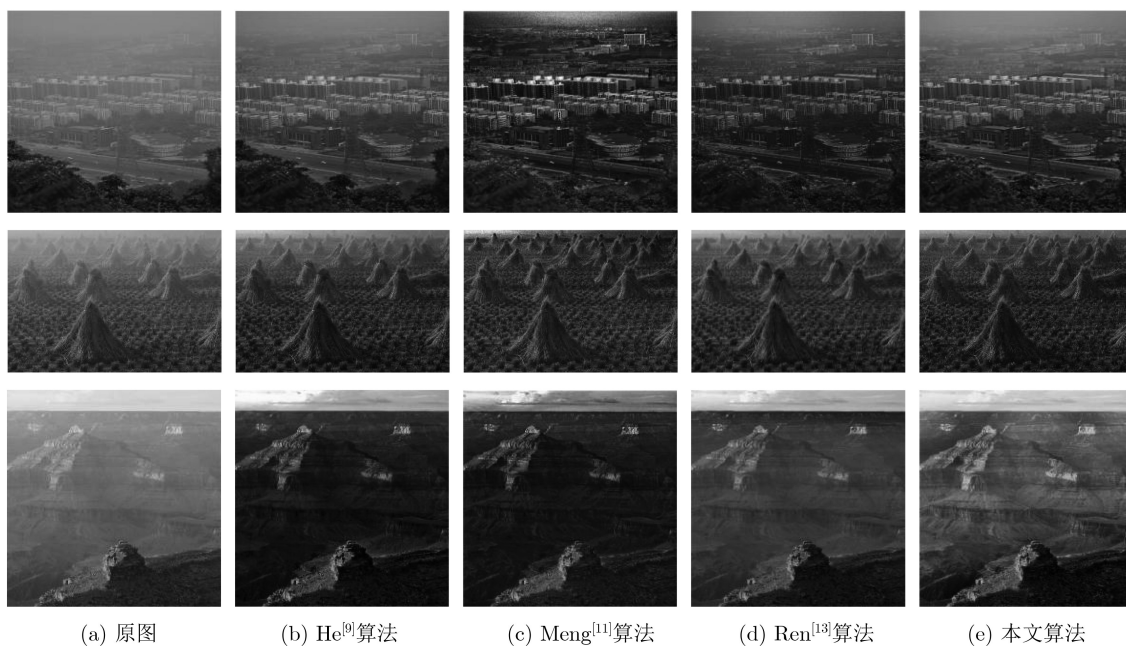


图9 远近景交替组图像(图像4-图像6)

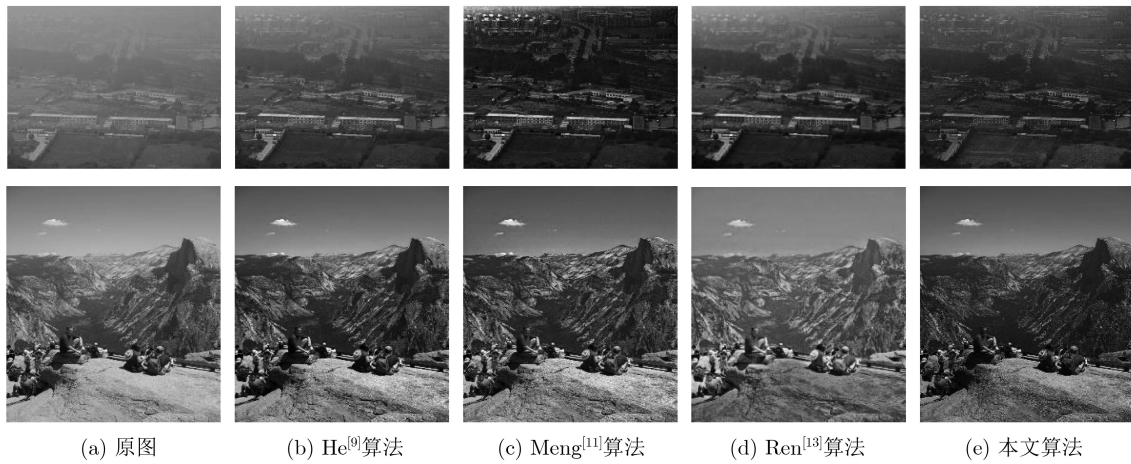


图 10 远景组图像(图像7-图像8)

光晕效应和颜色失真等问题，有较彻底的去雾效果，如图8(e)、图9(e)、图10(e)所示。

4.2 客观评价

因为主观评价具有片面性，为了建立一个更加全面且完善的评价体系，本文采用客观评价对算法进行补充验证。使用在图像去雾领域中被广泛采用的可见边缘梯度法^[17,18]，通过可见边集合数 e ，平均梯度 r ，饱和像素点个数 θ 以及各个算法的运行时间 $T(s)$ 为客观评价指标。其中， e 和 r 的值越大则表明复原图像的效果越好， θ 和运行时间 T 越小越好，数学表达式如式(17)–式(19)。

$$e = \frac{n_r - n_0}{n_0} \tag{17}$$

$$r = \exp \left[\frac{1}{n_r} \sum_{P_i \in \Delta} \ln r_i \right] \tag{18}$$

$$\theta = \frac{n_s}{W \times H} \tag{19}$$

其中， n_r 和 n_0 分别表示有雾和无雾图像的可见边数量， r_i 是在某一点结果图和原图的平均梯度比，

Δ 为最终结果可见边的集合， n_s 指饱和点像素个数， W 和 H 表示图像的宽和高。客观评价结果如表2和表3所示。

本文算法恢复的无雾图像色彩保持较好，有更多的细节信息和更清楚的图形轮廓。通过实验数据可以看出：在指标 e 上取得了领先优势，而指标 r 也不落后于其它经典算法，证明了本文算法的可行性和有效性。

本文算法结果亮度适宜，所以指标 θ 更低。在评价一个算法能否实时处理，最重要的指标就是运行时间，运行时间越低实时处理性越强。在时间指标上，可以看出在处理相同图像时本文算法所用时间最短。综上所述，相比于其他经典算法，本文所提算法更具有优势。

5 结束语

针对暗通道先验去雾算法的不足，本文提出了一种基于均值不等关系优化的自适应图像去雾算法。首先建立简化的扇形模型；然后设定自适应高斯均值函数估计模型边界；最终利用均值不等关系

表 2 各个算法的 e 和 r 指标对比

图像	He ^[9] 算法		Meng ^[11] 算法		Ren ^[13] 算法		Cai ^[12] 算法		Sun ^[16] 算法		本文算法	
	e	r	e	r	e	r	e	r	e	r	e	r
1	4.50	1.28	5.82	1.79	7.55	1.47	2.76	1.08	6.44	1.22	9.01	1.41
2	8.44	1.69	5.36	2.48	20.71	1.52	17.87	1.56	15.74	1.49	18.68	1.81
3	13.89	1.70	22.56	2.59	10.82	1.97	9.11	1.47	11.22	2.01	21.83	2.01
4	10.83	1.48	24.93	3.77	27.00	3.01	9.87	1.36	12.74	1.99	22.63	2.22
5	6.87	1.28	12.12	1.69	15.61	1.76	11.10	1.28	17.25	2.06	17.18	1.64
6	26.23	1.73	31.11	1.90	31.36	2.60	18.85	1.30	22.75	1.94	30.04	2.38
7	15.51	1.85	38.03	4.12	20.35	2.55	14.53	1.63	24.74	2.98	18.47	2.95
8	3.69	1.41	3.12	1.58	8.94	1.79	2.49	1.13	6.33	1.74	8.56	1.42
均值	11.24	1.55	17.88	2.49	17.79	2.08	11.82	1.35	14.65	1.93	18.30	1.98

表3 各个算法的 θ 和 $T(s)$ 指标对比

图像	He ^[9] 算法		Meng ^[11] 算法		Ren ^[13] 算法		Cai ^[12] 算法		Sun ^[16] 算法		本文算法	
	θ	T	θ	T	θ	T	θ	T	θ	T	θ	T
1	0.00018	2.51	0.00651	3.80	0	4.27	0.00931	3.01	0.00347	2.47	0.00001	2.65
2	0.00022	2.56	0.00355	3.16	0	3.05	0	2.87	0.00019	2.67	0.00001	2.04
3	0.00031	2.38	0.00066	3.08	0	3.78	0.00197	2.94	0.00162	2.01	0	2.06
4	0	2.61	0.00003	4.54	0	4.60	0.00126	2.98	0.00276	2.39	0	2.07
5	0.00036	2.46	0.00004	3.50	0.00013	2.67	0	4.01	0	2.00	0	2.07
6	0.00161	2.80	0	4.40	0	3.36	0.00118	3.68	0.00019	2.17	0	2.09
7	0.00009	3.02	0.00014	5.10	0	3.22	0	3.31	0	2.57	0	2.43
8	0.00294	3.94	0.00079	6.55	0.00018	3.34	0.00169	7.34	0.00024	2.77	0.00016	2.55
均值	0.00071	2.78	0.00146	4.27	0.00003	3.53	0.00192	3.77	0.00105	2.38	0.00002	2.25

进行边界逼近,进而得到最佳透射率,并结合改进的局部大气光的探索方法,得到复原结果。实验结果表明,本文算法去雾彻底,能广泛适用于各类图像,没有颜色失真和光晕效应,在客观评价指标也不落后于其它算法,同时具有较低的时间复杂度。但是所提算法也存在着不足之处,对于一些超远景图像会产生部分失真现象,还有待改进。

参考文献

- [1] 周妍,李庆武,霍冠英.基于非下采样Contourlet变换系数直方图匹配的自适应图像增强[J].光学精密工程,2014,22(8):2214-2222. doi: 10.3788/OPE.20142208.2214.
- [2] ZHOU Yan, LI Qingwu, and HUO Guanying. Adaptive image enhancement based on NSCT coefficient histogram matching[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(8): 2214-2222. doi: 10.3788/OPE.20142208.2214.
- [3] CHEN Yang, LI Dan, and ZHANG Jianqiu. Complementary color wavelet: A novel tool for the color image/video analysis and processing[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 2019, 29(1): 12-27. doi: 10.1109/TCSVT.2017.2776239.
- [4] 刘海波,杨杰,吴正平,等.基于暗通道先验和Retinex理论的快速单幅图像去雾方法[J].自动化学报,2015,41(7):1264-1273. doi: 10.16383/j.aas.2015.c140748.
- [5] LIU Haibo, YANG Jie, WU Zhengping, et al. A fast single image dehazing method based on dark channel prior and Retinex theory[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2015, 41(7): 1264-1273. doi: 10.16383/j.aas.2015.c140748.
- [6] SCHECHNER Y Y, NARASIMHAN S G, and NAYAR S K. Polarization-based vision through haze[J]. *Applied Optics*, 2003, 42(3): 511-525. doi: 10.1364/AO.42.000511.
- [7] NARASIMHAN S G and NAYAR S K. Interactive (de) weathering of an image using physical models[C]. 2003 IEEE Workshop on Color and Photometric Methods in Computer Vision, Nice, France, 2003: 1-8.
- [8] TAN R T. Visibility in bad weather from a single image[C]. 2008 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Anchorage, USA, 2008: 1-8. doi: 10.1109/CVPR.2008.4587643.
- [9] FATTAL R. Single image dehazing[J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2008, 27(3): 72. doi: 10.1145/1360612.1360671.
- [10] TAREL J P and HAUTIERE N. Fast visibility restoration from a single color or gray level image[C]. The 12th IEEE International Conference on Computer Vision, Kyoto, Japan, 2009: 2201-2208. doi: 10.1109/ICCV.2009.5459251.
- [11] HE Kaiming, SUN Jian, and TANG Xiaoou. Single image haze removal using dark channel prior[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2011, 33(12): 2341-2353. doi: 10.1109/TPAMI.2010.168.
- [12] ZHU Qingsong, MAI Jiaming, and SHAO Ling. A fast single image haze removal algorithm using color attenuation prior[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2015, 24(11): 3522-3533. doi: 10.1109/TIP.2015.2446191.
- [13] MENG Gaofeng, WANG Ying, DUAN Jianguyong, et al. Efficient image dehazing with boundary constraint and contextual regularization[C]. 2013 IEEE International Conference on Computer Vision, Sydney, Australia, 2013: 617-624. doi: 10.1109/ICCV.2013.82.
- [14] CAI Bolun, XU Xiangmin, JIA Kui, et al. DehazeNet: An end-to-end system for single image haze removal[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2016, 25(11): 5187-5198. doi: 10.1109/TIP.2016.2598681.
- [15] REN Wenqi, LIU Si, ZHANG Hua, et al. Single image dehazing via multi-scale convolutional neural networks[C]. The 14th European Conference on Computer Vision, Amsterdam, The Netherlands, 2016: 154-169. doi: 10.1007/978-3-319-46475-6_10.
- [16] 江巨浪,孙伟,王振东,等.基于透射率权值因子的雾天图像融合增强算法[J].电子与信息学报,2018,40(10):2388-2394. doi: 10.11999/JEIT171032.

- JIANG Julang, SUN Wei, WANG Zhendong, *et al.* Integrated enhancement algorithm for hazy image using transmittance as weighting factor[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2018, 40(10): 2388–2394. doi: [10.11999/JEIT171032](https://doi.org/10.11999/JEIT171032).
- [15] HE Kaiming, SUN Jian, and TANG Xiaoou. Guided image filtering[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2013, 35(6): 1397–1409. doi: [10.1109/TPAMI.2012.213](https://doi.org/10.1109/TPAMI.2012.213).
- [16] SUN Wei, WANG Hao, SUN Changhao, *et al.* Fast single image haze removal via local atmospheric light veil estimation[J]. *Computers & Electrical Engineering*, 2015, 46: 371–383. doi: [10.1016/j.compeleceng.2015.02.009](https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2015.02.009).
- [17] MIN Xionghuo, ZHAI Guangtao, GU Ke, *et al.* Objective quality evaluation of dehazed images[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2019, 20(8): 2879–2892. doi: [10.1109/TITS.2018.2868771](https://doi.org/10.1109/TITS.2018.2868771).
- [18] 杨爱萍, 王南, 庞彦伟, 等. 人工光源条件下夜间雾天图像建模及去雾[J]. *电子与信息学报*, 2018, 40(6): 1330–1337. doi: [10.11999/JEIT170704](https://doi.org/10.11999/JEIT170704).
- YANG Aiping, WANG Nan, PANG Yanwei, *et al.* Nighttime haze removal based on new imaging model with artificial light sources[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2018, 40(6): 1330–1337. doi: [10.11999/JEIT170704](https://doi.org/10.11999/JEIT170704).
- 杨 燕: 女, 1972年生, 博士, 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.
- 王志伟: 男, 1996年生, 硕士生, 主要研究方向为数字图像处理、计算机视觉.