

文章编号:1001-9081(2016)03-806-05

DOI:10.11772/j.issn.1001-9081.2016.03.806

## 基于相对透射率估计的快速图像去雾算法

杨 燕\*, 王 帆, 白海平

(兰州交通大学 电子与信息工程学院, 兰州 730070)

(\*通信作者电子邮箱 yangyantd@mail.lzjtu.edu.cn)

**摘要:**针对暗通道先验算法中恢复效果偏暗以及运算时间过久的问题,提出一种基于相对透射率估计的单幅图像快速去雾算法。该算法在分析雾霾条件下场景深度与最小值图像关系的基础上,依据景深相对量初步估计透射率,利用改进的均值滤波器作精确化调整,最后根据大气散射模型复原清晰图像,并通过亮度增强改善其视觉效果。该算法对透射率的估计简单、有效,复原图像清晰、自然,并且具有较高的细节可见度和层次感。实验结果表明,该算法在去雾效果和处理速度方面均有很大改善,有利于实现实时性应用。

**关键词:**图像去雾; 暗原色先验; 透射率; 图像复原; 图像增强

**中图分类号:** TP391.41    **文献标志码:**A

### Fast image dehazing algorithm based on relative transmittance estimation

YANG Yan\*, WANG Fan, BAI Haiping

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

**Abstract:** Since the dark channel prior algorithm has dull restoration effect and too long processing time, a fast dehazing algorithm for single image based on relative transmittance estimation was proposed. On the basis of the analysis of relationship between field depth under haze condition and minimum image of color channel (RGB) images, a preliminary transmittance was estimated through the relative amount of field depth, and then it was adjusted with an improved mean filter. At last, the clear image could be recovered by the atmospheric scattering model and the brightness was enhanced to improve its visual effects. The estimation of transmittance in this paper is simple and effective, the restored images are clear and natural, and have high detail visibility and scenery layering. The experimental results show that the proposed algorithm has great improvement in image dehazing quality and computational time, which is propitious to achieve real-time application.

**Key words:** image dehazing; dark channel prior; transmittance; image restoration; image enhancement

## 0 引言

雾霾天气条件下,由于大气粒子的散射、折射等作用,成像系统所获得的图像中场景光能量衰减,同时还引入了一部分大气光,使得图像对比度下降,细节信息丢失,直接影响了各种户外监控系统的正常工作。近年来,随着雾霾天气的频繁出现,户外图像的清晰化处理成为许多学者关注的热点。

目前国内外对图像去雾算法的研究主要分为两大类:一类是雾天图像增强方法<sup>[1-3]</sup>,具有代表性的为直方图均衡化方法、同态滤波方法、Retinex 方法等,该类方法通过提高雾天图像的对比度来增强图像中的细节信息,并根据后续颜色校正来改善图像视觉效果,但由于没有考虑雾天图像的退化模型,容易造成去雾图像的信息丢失。另一类是雾天图像复原方法,该方法以图像退化的物理模型为基础,反演退化过程,达到去雾目的,此方法处理效果自然逼真,但其难点是模型中参数的估计。Tan<sup>[4]</sup>发现无雾图像的对比度高于有雾图像,通过最大化复原图像的局部对比度来实现单幅图像去雾处理,该方法复原的图像会产生一定程度的色度偏差。Fattal<sup>[5]</sup>假设透射率与物体表面阴影局部不相关,利用独立成分分析

方法和马尔可夫随机场模型实现去雾,由于该方法依赖于退化图像的统计特性,对于浓雾图像的处理不够理想。Tarel 等<sup>[6]</sup>通过图像滤波估计大气散射函数,再经过色度调和得到复原图像,该方法恢复的图像整体偏暗,且景深突变处容易产生 Halo 效应;He 等<sup>[7]</sup>提出的暗通道先验去雾算法,使去雾研究产生新的突破,具有很好的处理效果,但其利用抠图法来处理景物边缘,算法复杂度高,处理速度太慢。禹晶等<sup>[8]</sup>利用双边滤波方法来保持场景边缘信息,但双边滤波的引入同样提高了算法复杂度。为了提高效率,He 等<sup>[9]</sup>提出引导滤波算法可以代替软抠图部分,但滤波参数的设置应该因图而异,不具统一性。近年来,也有不少学者以上述算法为基础作了部分改进,孙小明等<sup>[10]</sup>利用分块思想自适应估计透射率,通过阈值判断图中明亮区域;李加元等<sup>[11]</sup>通过加入天空识别算法来改善暗原色先验算法对天空区域的处理效果,这些改进取得了一些成果,但同时也存有不足。

本文针对暗通道先验算法的不足,提出了一种新的透射率估计方法,先对透射率图像进行粗略估计,利用改进的边缘保持平滑滤波器实现细节信息的弱化,并自适应获得精确的透射率图像,从而有效避免了引导滤波或软抠图方法对暗通道图像

收稿日期:2015-08-20;修回日期:2015-10-26。    基金项目:国家自然科学基金资助项目(61561030);甘肃省科技厅自然科学基金资助项目(1310RJZA050);甘肃省财政厅基本科研业务费资助项目(214138);兰州交通大学研究生校内教改项目(160012)。

**作者简介:**杨燕(1972-),女,河南临颍人,副教授,博士,主要研究方向:数字图像处理、智能信息处理、语音信号处理; 王帆(1989-),男,甘肃平凉人,硕士研究生,主要研究方向:数字图像处理; 白海平(1988-),女,河北唐山人,硕士研究生,主要研究方向:数字图像处理。

的细化操作,大大降低了算法复杂度。此外,针对暗通道先验去雾算法对天空区域的不适用问题,加入了相应的预处理方法进行修正,消除了复原图像天空假彩色现象,并且,本文针对暗原色先验算法去雾效果偏暗的问题,提出了一种新的去雾图像后续处理方法,可有效增强图像整体亮度和细节可见度。

## 1 雾天图像形成模型

雾霾条件下图像质量下降主要有两方面原因:一方面是大气粒子的散射作用,从景物反射的光通量部分被粒子吸收或反射,使到达观察者的人射光被衰减;另一方面,大气粒子的反射作用还会将一部分来自天空的自然光散射量附加到目标图像上,可见,雾霾天气下景物反射光与大气光一起参与成像。Narasimhan 大气散射模型<sup>[12]</sup>被广泛应用于去雾技术的研究,该模型描述如下:

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

其中: $I(x)$ 为观察到的有雾图像, $J(x)$ 表示所对应的理想无雾图像; $A$ 为大气光强度值; $t(x)$ 为透射率,反映了景物光线通过媒介透射到相机过程中未被散射部分的比率,当大气分布均匀时,可由式(2)表示; $\beta$ 为大气散射系数; $d(x)$ 为场景点到观测点的距离,通常称为景深。

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

大气散射模型中, $J(x)t(x)$ 为景物直接衰减项, $A(1 - t(x))$ 为大气光成分,图像去雾的目的就是要最大限度地减少环境光影响,充分再现场景信息。

## 2 本文算法

本文结合大气散射模型和暗原色先验基本理论,提出了一种透射率相对估计的快速去雾算法:首先求取相对透射率图像,根据大气光幕的特性,利用改进的均值滤波完成景深突变边缘的保持和同景深细节信息的弱化,并根据有雾图像的灰度值范围对透射率作精确化调整,然后利用暗原色先验方法估计大气光值,并通过大气散射模型复原无雾图像,最后对去雾图像寻求统一函数进行亮度增强,提高其视觉效果。该方法不仅降低了计算复杂度而且可获得具有较高视觉效果的去雾图像。算法流程如图 1 所示。

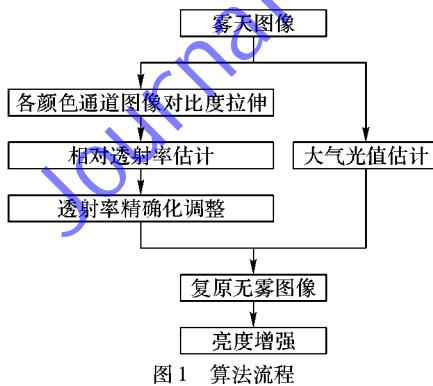


图 1 算法流程

### 2.1 大气光值估计

目前很多单幅图像去雾霾方法都是将图像中的最大像素值当作整体大气光来处理,但实际上最大像素值点可能来自于白色物体或建筑物,这样容易产生错误的估计,使得恢复图像存在不同程度的色偏,因此,本文采用 He 的方法来获得大气光值:首先选取暗通道中最亮的 0.1% 像素点,然后将这些

像素点所对应的有雾图像中像素最大值选作整体大气光。大量实验表明,这种方法可以有效避免白色物体的干扰,提高估计的准确性。

### 2.2 透射率估计

#### 2.2.1 透射率初步估计

He 等<sup>[7]</sup>通过对户外无雾清晰图像的统计分析发现,除天空和白色区域外,场景暗通道图像中大约有 75% 的像素强度值为 0,90% 的像素强度值低于 25。而在雾霾条件下,环境光对成像的影响会随着景深的增大而增强,从视觉效果来看,图像中雾的浓度变大,图像会相应地变亮。可见,有雾场景的最小值图像近似代表了雾气分布浓度。为了避免现有透射率细化耗时大的缺点,在减少复杂度的同时获得较为准确的透射率信息,本文利用最小值图像,通过相对景深来实现透射率的初步估计。

由于无雾图像的近景鲜艳区域、阴影以及黑色表面区域总存在像素值为零的点,它对应有雾图像三通道的最小值点,令其为  $i(x,y)$ ,由式(1)可知,该点的透射率为:

$$t_0 = (A - i(x,y))/A \quad (3)$$

根据 He 等的发现,当场景中有雾气存在时,有雾图像的最小值图像间接反映了场景深度信息,因此本文结合暗通道先验理论和大气散射模型,利用最小值图像与  $i(x,y)$  来估计有雾图像的相对景深,由式(4)表示,其中  $I_{dark}$  为最小值图像, $d_0$  为  $i(x,y)$  点的景深, $d(x,y)$  为图像各像素点的相对景深,令  $\lambda$  为景深相对系数,如式(5)所示:

$$d(x,y) = \left[ \frac{\ln(\frac{A}{A - I_{dark}})}{\ln(\frac{A}{A - i(x,y)})} \right] d_0 \quad (4)$$

$$\lambda = \frac{\ln(\frac{A}{A - I_{dark}})}{\ln(\frac{A}{A - i(x,y)})} \quad (5)$$

获得最小值点的透射率  $t_0$  和其他像素点的相对景深  $d(x,y)$  后,由式(2)可知,场景各点的相对透射率为:

$$t(x) = e^{-\beta d(x,y)} = e^{-\beta \lambda d_0} \quad (6)$$

即:

$$t(x) = t_0^\lambda \quad (7)$$

如果有雾图像包含近景区域,所选  $i(x,y)$  的取值可能为 0,所求  $t_0$  值为 1,相对透射率会失真,因此,需要对  $i(x,y)$  作一个简单的界定来控制相对透射率估计的准确性。由式(5)可知,λ 的值与  $I_{dark}$  成正比,对于  $I_{dark}$  小于  $i(x,y)$  的区域,λ 值会小于 1,根据式(7)可知其相对透射率会变大,这虽然符合透射率图像的规律,但会造成透射率估计以  $i(x,y)$  为界出现不同的相对量关系,使图像产生不必要的轮廓。在此,本文设定  $i(x,y)$  的最小值为 1 个像素强度值,只有当  $I_{dark}$  为 0 时透射率值为 1,这样不仅改善了相对透射率估计的准确性,也可以保证其自然的整体效果。

当成像场景中有雾气存在时,由于大气粒子的一系列折射、散射等作用,来自某一对象的反射光不仅影响了该对象本身成像效果,对其周围一定范围内其他景物的成像也会产生影响。因此,大气散射模型中的透射率图像应遵循两个原则<sup>[13-14]</sup>:深度一致性原则 (Depth-Consistency Principle, DCP) 和空间连续性原则 (Space-Continuity Principle, SCP)。

DCP 是根据透射率与景深公式提出的,对于同一场景深度的物体,透射率相同,与场景细节无关;SCP 表明雾气在环境中均匀分布,透射率随景深变化时没有很锐利的边缘信息。

一般情况下,式(7)估计的透射率包含较多细节信息,根据以上经验,需要作进一步弱化处理,现有论文中多采用高斯滤波、双边滤波、中值滤波等方法,高斯滤波器的权值由邻域像素与中心像素点的距离确定,没有充分考虑像素值的变化,恢复图像容易产生光晕,双边滤波虽然对高斯滤波的缺点作了相应改善,提高了处理效果,却是以处理时间为代价的,中值滤波对景深突变边缘估计不够准确,容易造成去雾场景的边缘残雾现象。为了达到平滑效果并保持所需的边缘信息,本文采用改进的均值滤波进行处理,由于均值滤波会改变景深突变处的边缘信息,使得景深较大一侧透射率估计偏小,景深较小一侧透射率估计偏大,复原图像容易产生 Halo 效应,为了修正这一缺点,对均值滤波器作以下改进:设滤波器掩模大小为  $n \times n$ ,对掩模内的像素值由大到小进行排序:1) 如果掩模中心像素值处于排序前  $[1, \frac{1}{3}(n \times n)]$  范围内,取排序的前  $\frac{2}{3}(n \times n)$  个像素值的加权平均作为滤波结果;2) 如果中心像素值处于  $(\frac{1}{3}(n \times n), \frac{2}{3}(n \times n)]$  范围内,取掩模所有像素值的加权平均值作为滤波结果;3) 如果中心像素值处于  $(\frac{2}{3}(n \times n), n \times n]$  范围,取排序后  $\frac{2}{3}(n \times n)$  个像素值的加权平均值作为滤波结果。相对以上滤波效果,改进的均值滤波器既降低了算法复杂度,也可改善其边缘保持效果。

### 2.2.2 透射率自适应调整

根据式(2), $t(x)$  值与场景深度信息密切相关,景深增大时, $t(x)$  值按照指数函数衰减至 0。由 He 的理论<sup>[1]</sup>可知,雾天图像的最小值图像与场景深度成正比,因此,最小值图像的亮度范围在一定程度上决定了透射率图像的亮度范围。以上章节采用相对量实现透射率的估计,对于包含近景区域的图像有较为准确的处理效果,对于远景图像和雾气较大的场景来讲,会缩小透射率的估计范围,导致部分区域去雾不彻底。为了提高估计的准确性,本文从有雾场景灰度图像的亮度范围出发,对透射率进行相应的调整(调整只需有雾图像的亮度范围,与图像细节信息无关,因此本文选择灰度图像代替最小值图像,可以有效避免场景颜色信息的干扰,准确反映出图像的亮度信息)。在灰度图像中,最大值点对应透射率的最小值,同样,最小值点对应透射率最大值(当灰度值为 1 时,为天空区域,其透射率为 0;灰度值为 0 时,为近景区域,透射率为 1),因此,如果灰度图像的像素值范围为  $[min, max]$ ,对透射率进行自然拉伸,使其控制在  $[1 - max, 1 - min]$  范围内,可以针对输入图像得到更准确的估计结果。

### 2.3 恢复去雾场景

有了对透射率  $t(x)$  和大气光  $A$  的估算,将其代入式(1)就可恢复无雾图像。实验证明,对天空等高亮度区域,当透射率趋近于零时,式(1)中  $J(x)t(x)$  项趋近于零,复原图像包含较大噪声,出现不必要的颜色信息,本文借鉴 He 的处理方法,为透射率设定一个下限值  $t_0$ ,取值为 0.1,相应复原图像表达式为:

$$J(x) = \frac{I(x) - A}{\max(t(x), t_0)} + A \quad (8)$$

### 2.4 色彩校正及亮度处理

现有去雾算法中,对景物和天空区域的处理经常顾此失彼,最大限度还原场景信息的同时容易在天空区域引入假彩色。本文为了改善处理效果,在透射率估计之前,先对有雾图像进行小范围的拉伸操作,将有雾图像灰度从  $[0, 0.95]$  拉伸到  $[0, 1]$ ,这样既弱化了天空区域的通道值差异,使得恢复效果更加自然,又在一定程度上增强了景物部分的对比度,有助于相对透射率的准确估计。

基于大气散射模型的雾天图像复原虽然能得到较为真实的场景信息,但复原图像较为暗沉,部分细节信息没有得到很好的增强。本文通过实验,采用 imadjust 函数进行亮度修正,可以在提高图像的整体亮度的同时有针对性地增强图像暗区域的对比度,使图像具有更好的视觉效果。为了保证图像颜色信息不丢失,需要对图像三通道寻求统一系数进行调整,由于灰度图像对复原场景各通道颜色信息没有较大的依赖,可以更准确地反映出场景的亮度信息和视觉效果,因此,本文首先对去雾图像的灰度图进行 imadjust 调整,然后将调整后的图像与灰度图像相比获得图像各点的调整系数,最后利用此调整系数来增强各通道图像。由函数的性质可知,参数 gamma 取值越大,对图像的增强效果越弱,取值太小又容易使颜色鲜艳的场景像素值超出亮度值范围,改变颜色的显示效果,经过实验验证 gamma 取值为 0.85,不仅可以达到预期的增强效果,而且对算法的适用范围不会产生太大影响。

## 3 实验分析

本文从透射率图像的特性出发,对滤波器作了针对性的改进。图 2 分别给出了本文方法与引导滤波所获得的透射率图像以及采用相同大气光值的去雾效果。比较图 2(b) 和图 2(c) 可知,本文方法对景物细节的弱化处理明显优于引导滤波,更接近理想的效果。从去雾结果可以看出,图 2(d) 中存在轻微的 Halo 效应(见图 2(f) 局部放大图像),而图 2(e) 效果更为自然,说明本文滤波方法在模糊图像的同时可以保持较为准确的边缘信息。

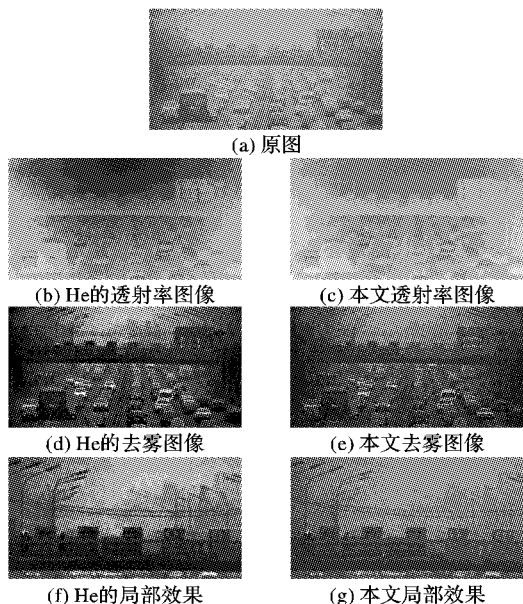


图 2 不同方法透射率图像及复原效果

为了验证本文提出算法的整体优越性,分别与 He 的引

导滤波算法<sup>[9]</sup>、多尺度 Retinex (Multiple Scale Retinex, MSR) 算法和 Tarel 的算法对不同场景下有雾图像复原效果进行对比,并从主观两方面作出评价。在操作系统 Windows 7, CPU 为 Pentium Dual-Core 2.20 GHz, 内存 2 GB 的普通 PC 机上实现仿真,仿真程序由 Matlab 编写,有雾图像选自 He 等在文献[7]中所使用的实验图像和一些去雾领域中的经典测试图像。

### 3.1 主观评价

图 3 给出了使用 He 算法、Tarel 算法、MSR 算法和本文算法去雾效果的对比图像。Tarel 算法利用中值滤波来估计透射率,并引入白平衡实现恢复图像的亮度增强,对于颜色鲜艳的物体具有较好的恢复效果,然而中值滤波容易造成景深突变处图像的边缘残雾现象(如图 3(c) 中对图像 1 左上角树叶的处理效果),而且白平衡对彩色图像没有按照统一的比例系数增强,会造成场景颜色失真,容易引起 Halo 效应(如图 3(c) 中对图像 2 和图像 4 的去雾效果)。He 算法利用引导滤波来优化暗通道图像,能够获得清晰、鲜艳的去雾场景,但去雾后的图像饱和度偏大,颜色有些失真,并且亮度偏暗(如图 3(b) 中对图像 1, 图像 2 和图像 3 的近景处理效果),对天空区域的处理往往存在假彩色(如图 3(b) 中对图像 3 和图像 4 的处理效果)。MSR 算法对局部对比度增强较为明显,但由于采用固定滤波器进行处理,对景深和雾的浓度变化不敏感(如图 3(d) 中对图像 2 的远景处理效果),而且复原图像去饱和,色彩偏灰,边缘部分也存在光晕效应(如图 3(d) 中对图像 1 的树叶处理效果)。相对来讲,本文算法能够恢复出清晰、自然的场景信息,有效减少天空区域假彩色现象,对去雾图像的亮度调整,不仅可以提高去雾图像较暗区域的细节可见度,也可以使处理后的图像亮度适中,更能体现景物的层次感。

### 3.2 客观评价

在去雾图像质量的客观评价方面,本文使用了平均梯度、信息熵及李大鹏等提出的无参考客观质量评测方法( $Q$  值)<sup>[15]</sup>。平均梯度是关于图像对比度、细节清晰度的反映,值越大,图像越清晰,层次越丰富。信息熵是反映场景信息量的指标,熵值越高,图像包含信息越多。 $Q$  值是李大鹏等综合细节强度、色调还原程度和结构信息三个方面得到的评价指标, $Q$  值越大,表明图像的整体质量越好。为了体现评价的一般性,本文选用图 3 中的图像 2、图像 3 和图像 4 作为统计对象,图像 2 为一般的场景图像,图像 3 和图像 4 均包含大面积天空区域,表 1 给出了各项指标的统计结果。

由表 1 客观数据可知,Tarel 算法利用白平衡来增强恢复图像亮度,使得图像的对比度和信息量有所提高,但其综合评价指标( $Q$  值)是对比算法中最小的,说明其恢复图像整体质量不够高。由图像 2 的去雾数据可以看出,对于一般场景图像来讲,本文算法与 He 的算法具有较为相似的处理效果,都可以有效增强场景对比度和信息量,提高图像整体质量,但由图像 3 和图像 4 的处理数据可知,图像包含明亮区域面积过大时,本文算法的  $Q$  值远大于 He 的算法,说明本文算法对明亮区域的处理效果明显优于该算法。MSR 算法平均梯度和信息熵较高,可以恢复出较多的场景结构信息,但总体评价指标不及 He 的算法和本文算法,复原图像整体效果较差。此外,从算法处理时间可以看出:MSR 算法复杂度低,处理速度最快;He 的算法使用引导滤波实现透射率修正,线性函数的求解较为费时;Tarel 算法中,中值滤波的模板尺寸一般取值较大,为图像较长边的  $1/25$ ,使得处理时间也相对较大;本文采用改进的均值滤波降低了算法复杂度,运算效率得到大幅度提升,同时可以节约大量内存空间,提高算法实时性。

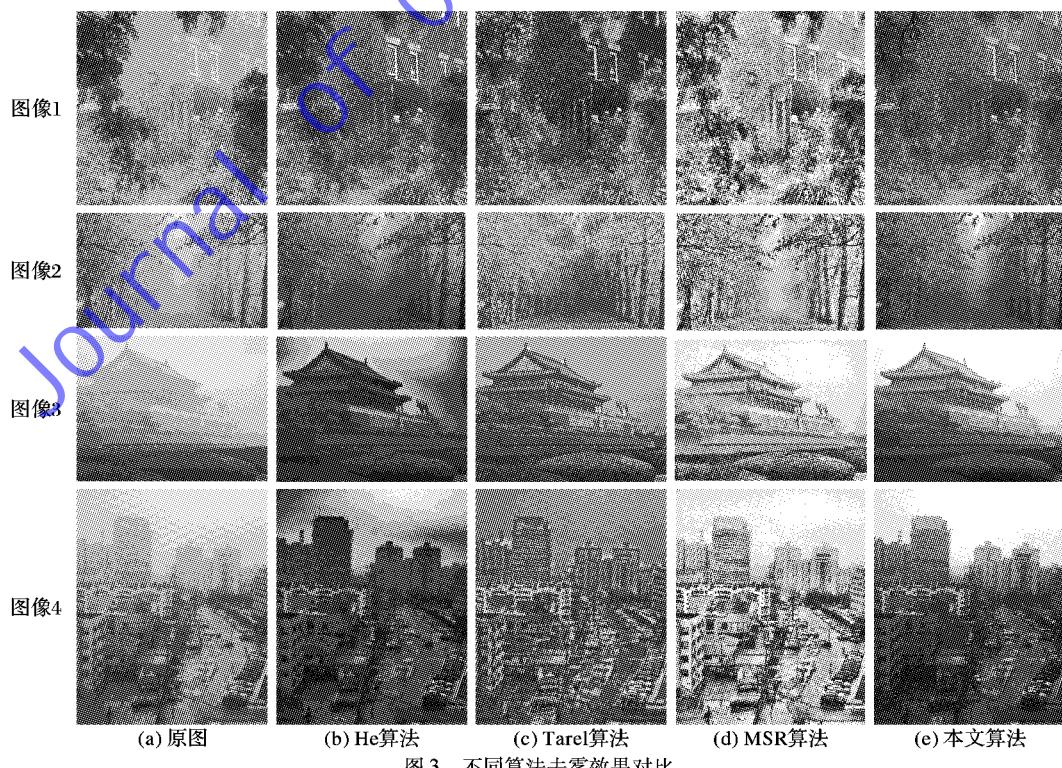


图 3 不同算法去雾效果对比

表1 不同算法处理结果对比

实验图片	去雾算法	平均梯度	信息量	Q值	处理时间/s
2314×188 图像	原图	0.0357	14.2453	—	—
	Tarel 算法	0.0456	15.3908	0.0132	3.19
	He 算法	0.0341	15.2032	0.1056	3.73
	MSR 算法	0.0682	15.2977	0.0713	1.32
	本文算法	0.0497	15.2773	0.1063	2.05
3600×450 图像	原图	0.0126	13.8823	—	—
	Tarel 算法	0.0325	15.5261	0.0337	14.17
	He 算法	0.0263	15.4061	0.0438	12.48
	MSR 算法	0.0324	15.6301	0.0401	2.26
	本文算法	0.0227	15.4125	0.2345	4.73
4388×590 图像	原图	0.0229	11.9643	—	—
	Tarel 算法	0.0309	14.6240	0.0693	11.39
	He 算法	0.0253	14.1367	0.0728	10.55
	MSR 算法	0.0494	14.9565	0.0698	2.31
	本文算法	0.0533	14.2064	0.1933	4.14

## 4 结语

本文分析现有单幅图像去雾技术,从新的角度提出了大气散射模型中相关参数的求法,并针对图像去雾的不足作了相应修正。第一,对有雾图像进行小范围的拉伸调整,减小了天空区域各通道像素值的差异,避免了天空区域假彩色现象;第二,根据实际需要对均值滤波作了相应改进,代替现有方法进行透射率调整,达到处理效果的同时大大降低了算法复杂度,提高了算法实时性;第三,针对去雾图像的灰度图进行亮度调整,提取调整参数并完成 R、G、B 通道图像的增强操作,可以提高去雾图像较暗处的细节可见度,提高图像视觉效果。综上所述,本文算法拥有较高的处理效率和较好的处理效果,更具实用价值。

## 参考文献:

- [1] 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.(WU D, ZHU Q S. The latest research progress of image dehazing[J]. Acta Automatica Sinica, 2015, 41(2): 221 – 239.)
- [2] 祝培,朱虹,钱学明,等.一种有雾天气图像景物影像的清晰化方法[J].中国图象图形学报,2004,9(1):124–128.(ZHU P, ZHU H, QIAN X M, et al. An image clearness method for fog [J]. Journal of Image and Graphics, 2004, 9(1): 124 – 128.)
- [3] 詹翔,周焰.一种基于局部方差的雾天图像增强方法[J].计算机应用,2007,27(2):510–512.(ZHAN X, ZHOU Y. Algorithm based on local variance to enhance contrast of fog-degraded image [J]. Journal of Computer Applications, 2007, 27(2): 510 – 512.)
- [4] TAN R T. Visibility in bad weather from a single image [C]//CVPR 2008: Proceedings of the 2008 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Piscataway, NJ: IEEE, 2008: 1 – 8.
- [5] FATTAL R. Single image dehazing [J]. ACM Transactions on Graphics, 2008, 27(3): Article No. 72.
- [6] TAREL J P, HAUTIERE N. Fast visibility restoration from a single color or gray level image [C]// Proceedings of the 2009 IEEE 12th International Conference on Computer Vision. Piscataway, NJ: IEEE, 2009: 2201 – 2208.
- [7] HE K, SUN J, TANG X. Single image haze removal using dark channel prior [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2011, 33(12): 2341 – 2353.
- [8] 禹晶,李大鹏,廖庆敏.基于物理模型的快速单幅图像去雾方法[J].自动化学报,2011,37(2):143 – 149.(YU J, LI D P, LIAO Q M. Physics-based fast single image fog removal [J]. Acta Automatica Sinica, 2011, 37(2): 143 – 149.)
- [9] HE K, SUN J, TANG X. Guided image filtering [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2013, 35(6): 1397 – 1409.
- [10] 孙小明,孙俊喜,赵立荣,等.暗原色先验单幅图像去雾改进算法[J].中国图象图形学报,2014,19(3):381 – 385.(SUN X M, SUN J X, ZHAO L R, et al. Improved algorithm for single image haze removing using dark channel prior [J]. Journal of Image and Graphics, 2014, 19(3): 381 – 385.)
- [11] 李加元,胡庆武,艾明耀,等.结合天空识别和暗通道原理的图像去雾[J].中国图象图形学报,2015,20(4):514 – 519.(LI J Y, HU Q W, AI M Y, et al. Image haze removal based on sky region detection and dark channel prior [J]. Journal of Image and Graphics, 2015, 20(4): 514 – 519.)
- [12] NARASIMHAN S G, NAYAR S K. Contrast restoration of weather degraded images [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2003, 25(6): 713 – 724.
- [13] 于敏杰,张浩峰.基于暗原色及入射光假设的单幅图像去雾[J].中国图象图形学报,2014,19(12):1812 – 1819.(YU M J, ZHANG H F. Single-image dehazing based on dark channel and incident light assumption [J]. Journal of Image and Graphics, 2014, 19(12): 1812 – 1819.)
- [14] 张冰冰.去雾通用框架及算法研究[D].厦门:华侨大学,2013:39 – 40.(ZHANG B B. Research on general fog-removal framework and algorithm[D]. Xiamen: Huqiao University, 2013: 39 – 40.)
- [15] 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.(LI D P, YU J, XIAO C B. No-reference quality assessment method for defogged images [J]. Journal of Image and Graphics, 2011, 16(9): 1753 – 1757.)

## Background

This work is partially supported by the National Natural Science Foundation of China (61561030), the Natural Science Foundation of Science and Technology Department of Gansu Province(1310RJZA050), the Fundamental Research Funds for Gansu Provincial Finance Department (214138), Graduate Educational Reform Project of Lanzhou Jiaotong University(160012).

**YANG Yan**, born in 1972, Ph. D., associate professor. Her research interests include digital image processing, intelligent information processing, speech signal processing.

**WANG Fan**, born in 1989, M. S. candidate. His research interest include digital image processing.

**BAI Haiping**, born in 1988, M. S. candidate. Her research interest include digital image processing.