

文章编号 1004-924X(2015)07-2100-09

结合最小滤波和引导滤波的暗原色去雾

王卫星*, 肖翔, 陈良琴

(福州大学 物理与信息工程学院, 福建 福州 350002)

摘要: 用基于暗原色信息的去雾方法处理雾化图像时, 需要考虑消除景深边缘处的白色晕块并降低修复透射率过程所耗费的时间。为了既能够有效地去除白色晕块又能够降低修复透射率的处理时间, 本文分析了最小滤波和引导滤波分别用于修复透射率的优缺点, 提出了采用最小滤波和引导滤波相结合的方法来修复透射率。该方法综合了两者的优点, 同时又弥补了各自的不足。较之于软抠图法, 不仅有效消除了白色晕块, 并且大大地降低了透射率处理时间, 提高了处理效率。另外, 针对传统暗原色去雾方法的缺点进行了改进。根据天空区域像素亮白的特性, 将颜色和大气光相近的像素视为天空区域像素, 然后对其进行颜色原值保留处理, 从而有效地消除天空区域颜色的失真和跳变, 从整体上改善了去雾复原图像的视觉效果。

关键词: 图像去雾; 暗原色; 透射率; 景深边缘; 最小滤波; 引导滤波

中图分类号: TP391.4 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20152307.2100

Image dark channel prior haze removal based on minimum filtering and guided filtering

Wang Wei-xing*, Xiao Xiang, Chen Liang-qin

(College of Physics and Information Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350002, China)

* Corresponding author, E-mail: wxw@FZU.edu.cn

Abstract: When a hazed image is processed by dark prior haze removal method, it should take the elimination of white halo on the depth-edge and the reduction of time consuming for modifying the transmittance into account. In order to eliminate the white halo on the depth-edge and to reduce the time consuming for modifying the transmittance, this article fully analyzes the advantages and disadvantages of minimum filtering and guide filtering in modifying transmittance, respectively. A new method in combination with the minimum filtering and the guide filtering is adopted to modify the transmittance, by which their advantages are taken and the inadequacies are made up. As compared with the traditional method, it not only eliminates the white halo but also reduces the processing time significantly. In addition, this paper improves the poor result of traditional dark prior method with a sky area in the hazy image. According to the bright-white features of the pixels in the sky area, the pixels with color values similar to that of the airlight are viewed as the sky area pixels. Then these pixels are processed to maintain their original color values and to eliminate the color distortion and

收稿日期: 2014-12-18; 修订日期: 2015-02-10.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 61170147); 福州大学科技发展基金资助项目(2014-XY-31)

jump existing in the sky area effectively. Thus, the visual effect of whole defogging restored image could be improved.

Key words: image haze removal; dark primary; transmittance; depth-edge; minimum filtering, guided filtering

1 引言

雾霾天气时,天空中存在大量的悬浮颗粒,这些悬浮颗粒对光具有散射作用,这一方面衰减了来自室外场景的反射光,另一方面渗入了大气环境光^[1-3],从而使人眼看到的景物模糊不清,取像设备获取的图像存在颜色偏移、对比度降低等退化现象。雾霾犹如一张遮蔽人眼和机器视觉的障目纱,给人们的日常社会工作和室外视频监控系统的正常作业造成了严重的干扰。因此,图像的去雾化具有重要的实用价值。

近年来,一些研究者从图像复原的角度提出了很多去雾方法。Tan 通过最大化图像对比度来估计大气散射光,从而有效增强了图像的视觉效果,但其并未恢复图像的实际值^[4]。Fattal 假设透射系数和场景反射强度不相关,建立了求解透射率的约束方程,其对薄雾图像取得了良好的去雾效果^[5]。场景的透射率在图像去雾化的过程中是一个非常重要的参数,然而准确获取透射率是个难点,He 等人利用暗原色先验规律来估计透射率,取得了良好的效果^[6],但在景深边缘跳变处存在严重的误差,致使去雾复原图像在景深边缘处出现白色晕块,接着,其运用软抠图法^[6]对透射率加以修复,有效地去除了白色晕块,但该方法涉及大规模稀疏矩阵的求解,比较耗时,且所费的内存资源巨大,远远不能满足去雾处理的实时要求。很多学者相继提出了一些改进方法^[7-10],但各有缺点。

本文提出采用一种最小滤波和引导滤波相结合的方法用于修复透射率。分析了最小滤波和引导滤波各自单独用于修复透射率时的优点和不足,采用最小滤波和引导滤波相结合的方法来修复透射率。由实验结果可知该方法显著降低了处理时间,也有效消除了白色晕块。

针对暗原色先验规律在图像天空亮白区域上是失效的,传统的暗原色去雾方法在处理图像天空区域时会出现颜色跳变、失真的现象^[12]。本文

根据天空区域像素的亮白特性,提出了一种判断图像有无天空区域的简单方法,对有天空区域的图像进行分割,并对该区域进行颜色原值保留处理,有效地消除了颜色失真,从整体上改善了图像的视觉效果。

2 暗原色去雾方法及其不足的分析

2.1 物理模型

根据光的散射机制和雾化图像形成的物理成因,公式(1)已被广泛用于描述雾化图像的物理模型^[3]:

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

$$t(x) = e^{-\beta I(x)}, \quad (1)$$

式(1)左边的代数式 $J(x)$ 表示获取的雾化图像。右边代数式的前一项为衰减模型,用于描述场景反射光因悬浮颗粒对光的散射作用而被衰减的程度,其中: $I(x)$ 表示清晰无雾图像即去雾复原图像; $t(x)$ 为场景点的透射率,用于描述光在单位距离上对空气的穿透能力,其值越小,对场景反射光的衰减越严重。由式(1)中的第二个式子可知,它和场景景深呈指数衰减关系,即在雾霾均匀的条件下,远距离场景的反射光比近距离反射光的衰减更为严重;后一项为大气光散射模型,用于描述雾化图像受大气光干扰的程度。由该式可知,透射率越小即距离越远的场景,渗入的大气光量越多,所受干扰越严重,其中 A 为无穷远处的大气光。

在雾化图像的物理模型中, $J(x)$ 是已知的雾化图像, $I(x)$ 是被求解的复原图像, $J(x)$ 和 $I(x)$ 间存在数学关系。因此,图像的去雾化过程是物理模型的逆过程,即依据已知的 $J(x)$ 求解模型方程,可以获取 $I(x)$ 。模型中的参数 $t(x)$ 和 A 是两个未知数,在去雾过程中需要准确估计这两个量,去雾处理即为准确估计参数 $t(x)$ 和 A 。

2.2 暗原色去雾过程

He 所做的统计实验表明,对大部分室外自然无雾图像而言,在其任意大小的非天空区域内

存在一些像素,这些像素的 3 个通道至少有一个通道的像素值很小,甚至接近零,这便是暗原色先验统计规律^[6]。根据此统计规律,一幅彩图的暗原色信息可用式(2)获取:

$$I^{\text{dark}}(x) = \min_{y \in \Omega(x)} (\min_{c \in \{r, g, b\}} I^c(y)). \quad (2)$$

依据暗原色先验规律可知,无雾自然图像的非天空区域的暗原色理应非常暗,而实际观察结果也显示,暗原色图在该区域的像素值非常低,甚至接近零,如公式(3)所示:

$$I^{\text{dark}}(x) \longrightarrow 0. \quad (3)$$

假设已经准确估计出大气环境光 A ,对式(1)左右两边除以 A ,然后对左右两边进行暗原色化处理,最后求解透射率 $t(x)$,得到公式(4),如下所示:

$$t(x) = \frac{1 - \min_{y \in \Omega(x)} \left\{ \min_{c \in \{r, g, b\}} \frac{J^c(y)}{A^c} \right\}}{1 - \min_{y \in \Omega(x)} \left\{ \min_{c \in \{r, g, b\}} \frac{I^c(y)}{A^c} \right\}}. \quad (4)$$

在公式(4)中,分母项中的暗原色图是无雾自然图像,根据式(3),可视之为零。而雾化图像渗入了大气环境光,其暗原色的像素值已经较高,不满足公式(3)的要求,所以公式(4)可进一步简化为公式(5),如下所示:

$$t(x) \approx 1 - \omega * \min_{y \in \Omega(x)} \left\{ \min_{c \in \{r, g, b\}} \frac{J^c(x)}{A^c} \right\}.$$

公式(5)中的 ω 是修正参数,取值为(0,1),它可以使透射率 $t(x)$ 的值变大, ω 取合适的值能使去雾后的复原图像显的更为自然。在透射率 $t(x)$ 和大气环境光 A 已知时,图像的去雾过程如公式(6)所示:

$$I(x) = \frac{J(x) - A}{\max\{t_0, t(x)\}} + A, \quad (6)$$

式中 t_0 被视为透射率最小临界值,一般取 0.1。

2.3 白色晕块形成原因的分析

为了方便叙述,本文将暗通道和暗原色视为两个不同的概念,所以暗通道图和暗原色图是两幅不同的图。暗原色已在上文介绍过,而暗通道指所有像素 R、G、B 3 个通道中灰度值最小的通道集合,暗通道图的获取即为暗原色图获取(公式(2))的第一步。过程描述如图 1 所示。

在暗原色图获取的过程中,有一个最小滤波过程,该过程意味着暗原色图中很多像素的灰度值可用于替代其掩模窗口区域内其它像素的灰度值。透射图由暗原色图的逆化所得,如公式(5)所

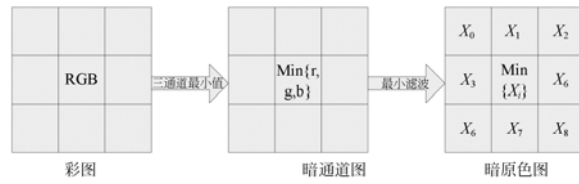


图 1 暗原色图的获取

Fig. 1 Acquisition of dark primary image

示。这表明图像中多数场景点的透射率以其临近区域场景点的透射率作为估计值,而非其本身的透射率值。由此可知,在整幅图像中场景点透射率估计暗含了一个假设,即认为在图像局部区域内,它们的透射率值相等或相近。这个假设是合理的,因为透射率和场景景深相关,如果场景点的景深相等或相似,它们的透射率便相等或相似,这恰好符合图像局部区域内场景景深变化缓慢的事实。

但是,对于场景景深边缘处,该假设是失效不适用的。透射率取决于场景的深度,因此,景深边缘两边场景点的透射率相差很大,但是,根据暗原色图、透射率图的获取过程可知,远场景点的透射率值是由其邻近的近场景点的透射率值来估计的,这导致景深边缘处远场景点的透射率估计偏高,误差较大。用于去雾时,这些过高估计的透射率作为值小于 1 的除数,对 $J(x) - A$ 3 个通道值的放大倍数变小,使得 $\Delta r, \Delta g, \Delta b$ (见公式(7))之间的差值变小。

$$\{\Delta r, \Delta g, \Delta b\} = \frac{\{J^r(x) - A^r, J^g(x) - A^g, J^b(x) - A^b\}}{t(x)}. \quad (7)$$

复原图像时, $\Delta r, \Delta g, \Delta b$ 对图像施加的影响削弱,而大气光 A 的影响变大,从而在景深边缘远场景处产生白色晕块。白色晕块如图 2(彩图见期刊电子版)中红箭头所示。

2.4 天空区域处理效果不理想的原因分析

雾霾图像的天空区域在视觉效果上与晴朗天空基本一致。在暗原色图中,这片区域的灰度值较高,而在透射图中,其灰度值很低。这意味着该区域的透射率很小,与天空区域的景深为无穷远的事实相吻合。因此,传统的暗原色去雾法用于处理天空区域时也可依据公式(6)进行。然而天空区域实际的处理效果很不理想,甚至出现颜色失真现象,如图 3 所示。



图 2 白色晕块示意图

Fig. 2 Examples of white halo block

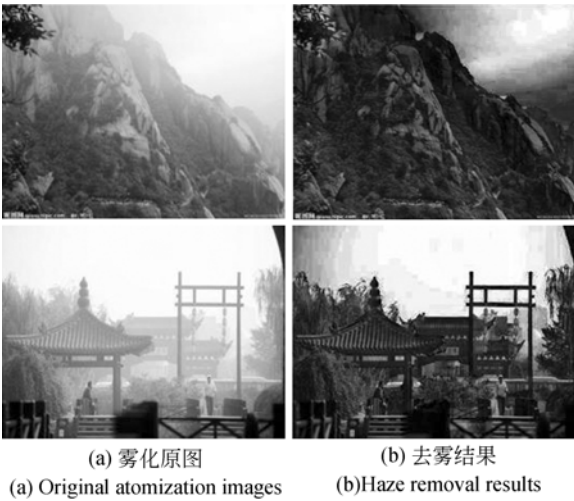


图 3 天空区域处理效果不理想示意图

Fig. 3 Poor processed results of sky area

观察图 3(a)~(b) 的两幅去雾复原图可知, 经过去雾处理后, 两幅图中天空区域间的视觉效果差异显著, 并伴随颜色失真, 同时出现块斑现象。雾化原图中, 两幅图天空区域间的视觉效果相似, 它们的颜色值和大气环境光 A 相差不大, 差值小则为 4、5 pixel, 大则数十个像素。但是利用公式(6)进行去雾处理时, 由于该区域的透射率很小, 致使 Δr 、 Δg 、 Δb 的放大倍数偏大, 并且它们之间的差值也变大, 对去雾过程的影响增大, 扩大了 RGB 三通道之间原有的差异, 在视觉效果上表现为颜色的失真以及块斑现象。对此, 下文提出了一种简单的天空区域处理方法。

3 最小滤波和引导滤波相结合法

软抠图法用于修复透射率时, 效果虽然良好, 但计算复杂, 远远不能满足去雾处理的实时要求。

为了降低修复透射率的复杂度和所需时间, 同时又能获得较好的效果, 本文提出采用最小滤波和引导滤波相结合的方法修复透射率, 具体分析见下文。

3.1 最小滤波修复透射率

上文指出, 景深边缘处白色晕块的形成是由于景深边缘远场景一侧的透射率被过高估计所引起的, 这些远场景的实际透射率与和它临近的同景深而不处于景深边缘处场景的透射率相差无几, 所以, 这一区域的透射率可用于修复景深边缘远场景处被过高估计的透射率, 这是一个中心像素定位在景深边缘远场景处而在包含两个场景区域的掩模窗口内取最小值的过程, 即最小滤波。另一方面, 需要注意的是为了使景深边缘近场景处的透射率不受此过程的影响, 最小滤波的模板大小务必要与获取暗原色时所用模板大小相等。最小滤波修复原始透射率的过程如公式(8)所示:

$$\tilde{t}_1(x) = \min_{y \in \Omega(x)} t(x). \quad (8)$$

3.2 引导滤波修复透射率

在估计原始透射率时, 景深边缘信息在透射图中已经完全丢失, 并产生伪边缘信息, 从而导致真实景深边缘信息的偏移, 偏移距离同获取暗原色时使用的模板大小相关。从修复景深边缘信息的角度考虑, 可运用引导滤波来修复透射率^[8]。根据引导滤波的定义可知, 要一幅保留了景深边缘信息的图像作为引导图^[11], 本文选用原始透射图作为输入图, 暗通道图的逆向图作为引导图, 即为公式(9)中的 I 。

$$\begin{aligned} \tilde{t}_2(x) &= a_k I_i + b_k \quad \forall i \in \omega_k \\ \tilde{t}_2(x) &= t(x) - n_i, \end{aligned} \quad (9)$$

公式(9)中的第一个公式用以修复景深边缘并获取输出透射率, 第二个公式用于制约修复后的透射率, 以最大程度接近原始透射率, 根据这个约束条件, 依据最小化代价函数(10)来确定上式的线性系数(a_k, b_k)。详细过程见文献[7]。

$$E(a_k, b_k) = \sum_{i \in \omega_k} ((a_k I_i + b_k - p_i)^2 + \epsilon a_k^2). \quad (10)$$

上述两种修复透射率方法的实验结果如图 4 所示。比较两幅透射率图可知, 经最小滤波修复后, 大部分景深边缘远场景处的透射率都变小了, 原始景深边缘得到了正确恢复, 并且比较尖

锐,但在景深边缘细节丰富而区域又很窄小的远场景区域,其透射率并没有得到有效的恢复;而经过引导滤波修复后,景深边缘也得到了恢复,但不够尖锐明显,而且透射图整体上显得模糊。从去雾效果来看,对原始透射率进行最小滤波修复后,

去雾复原图中景深边缘处的大部分白色晕块都得以有效消除,但在景深边缘细节丰富的区域,白色晕块依然存在,如图 4(g)中树叶缝隙处所示。需要指出的是,虽然有效去除了景深边缘处的白色晕块,但有些边缘处的彩色状态也受到了影响,图

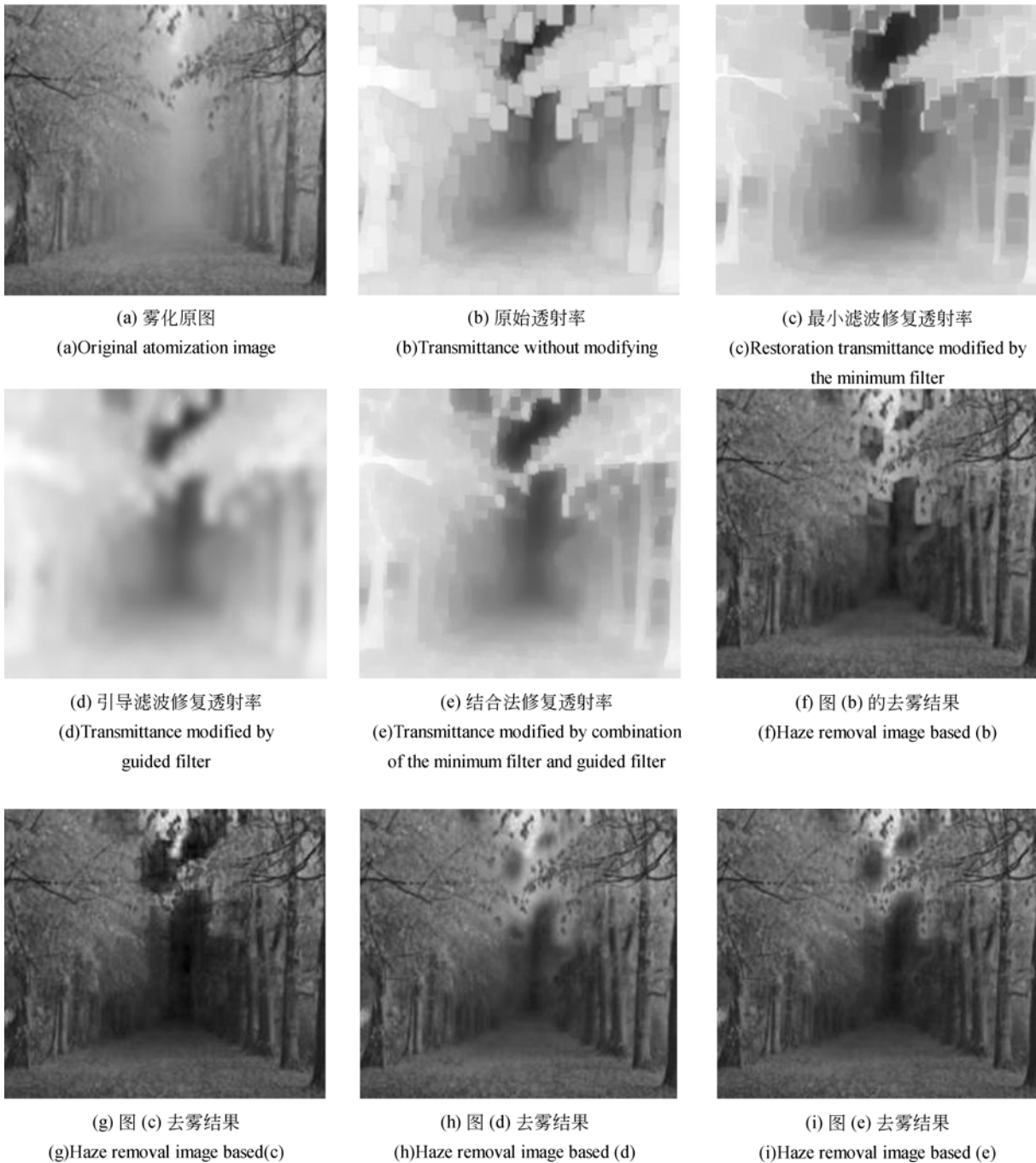


图 4 透射率和去雾效果对比

Fig. 4 Comparison of transmittance and haze removal results

像的颜色整体上变得有些饱和。而对原始透射率 进行引导滤波处理后,去雾复原图中景深边缘处

的白色晕块并没有完全消除,而是整体向四周扩散稀释了,这类似于软抠图法的效果,其复原图像的彩色状态比较自然。与软抠图法相比,其效果欠佳,但处理时间大大缩减,复杂度大大降低。

3.3 最小滤波和引导滤波结合修复透射率

由上述分析可知最小滤波和引导滤波单独用于修复透射率时各有优缺点,为了弥补它们各自的不足而保留各自的长处,本文提出了采用最小滤波和引导滤波相结合的方法来修复透射率,具体方法如公式(11)所示:

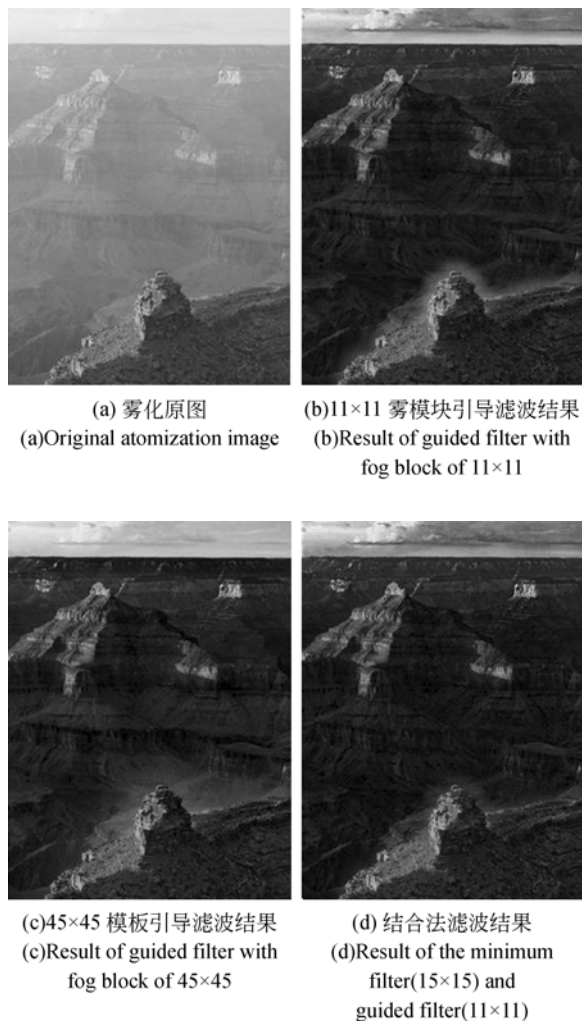
$$\tilde{t}(x) = a * \tilde{t}_1(x) + b * \tilde{t}_2(x)$$

$$a + b = 1 \quad a \in (0,1), b \in (0,1), \quad (11)$$

式(11)中的权值 a 和 b 可调,当 $a > b$ 时,在修复透射率时最小滤波的影响大于引导滤波的影响;当 $a < b$ 时,最小滤波的影响小于引导滤波的影响;当 $a = b$ 时,两者的影响相当。图 4(e)中, $a = 0.7, b = 0.3$ 。所以,较之于(c)、(d)图,(e)图在保留(c)图景深边缘明显尖锐的基础上,还融合了(d)图模糊的特点。表现在去雾复原图上,一方面消除了出现在(g)图上一些景深边缘处彩色状态发生变化的影响,扭转了表现在(g)图上颜色偏向饱和的趋势,另一方面,稀释了景深边缘细节丰富区域未能去除的晕块,也弥补了表现在(h)图上白色晕块消除不完全的缺陷。和软抠图法相比,在效果上,本文的方法没有表现出更多的优越性,但消除白色晕块的效果也是明显的。更为重要的是本文方法显著地降低了计算的复杂度,减少了处理过程所所耗费的时间和内存资源。表 1 给出了几种修复透射率方法的处理时间,所处理图像的大小为 600×400 ,结合法指的是最小滤波和

明一点,由于精力和时间的限制,未对 He 方法的软抠图法(Soft Matting)加以实现,软抠图法一栏的数据摘自文献[6]。

结合表 1 和图 5 可知,引导滤波所用的模板越大,它去除边缘处白色晕块的效果越好,图像越自然,但是所耗费的时间也越多。最小滤波和引导滤波的结合法中,引导滤波的模板大小为 11×11 ,但去除白色晕块的效果稍优越于模板大小为 45×45 的引导滤波,而且所耗费的时间少得多,唯一不足的是图像自然感欠缺,于蓝色天空处可见。



(a) 雾化原图 (a)Original atomization image
 (b) 11×11 雾模块引导滤波结果 (b)Result of guided filter with fog block of 11×11
 (c) 45×45 模板引导滤波结果 (c)Result of guided filter with fog block of 45×45
 (d) 结合法滤波结果 (d)Result of the minimum filter(15×15) and guided filter(11×11)

图 5 不同模板引导滤波及结合法的处理效果对比
 Fig. 5 Comparison between guided filters and combination method with different fog blocks

表 1 不同修复透射率方法耗时对比
 Tab. 1 Comparison of consuming time by different algorithms based on modifying transmittance (s)

算法类型	数据 1	数据 2	数据 3	平均	模板大小
最小滤波	0.437	0.422	0.437	0.432	15×15
引导滤波	2.953	2.938	2.937	2.943	11×11
引导滤波	42.375	42.407	42.468	42.417	45×45
相结合法	3.375	3.344	3.344	3.354	15×15 和 11×11
软抠图法				10~20	—

引导滤波相结合的算法,最小滤波的模板大小为 15×15 ,引导滤波的模板大小为 11×11 。另外说

从图 6(彩图见期刊电子版)的结果可知,与 He 方法相比,本文算法虽然在效果上未表现出

优越性,但从表 1 可知,本文算法的处理时间和复杂度较 He 方法有很大的改进。表 2 给出了图 6 去雾前后图像的灰度均值和灰度方差。由表 2 可知,在成像过程中,雾化图像场景反射光的衰减量要小于大气光的渗入量^[1],致使图像的灰度值整体提高。He 方法和本文算法都降低了雾化原图三通道的灰度均值,抑制了由于亮白大气光的渗入所引起的影响,但本文算法的抑制程度更大。由图 6 中的上图可见,经过去雾化处理,三通道的灰度方差都增大了,这意味着对比度提高了,本文算法的提高程度较弱。而由图 6 中的下图可知,只有绿通道的方差提高了,红、蓝通道的方差反而降低了,这是因为该图的色调以绿色、红色为主,蓝色最弱,所以去雾后,绿通道的对比度提高了,本文算法的提高程度更大,而蓝通道的对比度信

息受到了抑制。综上所述,从数据来讲,He 方法和本文算法针对不同的图像各有优劣。

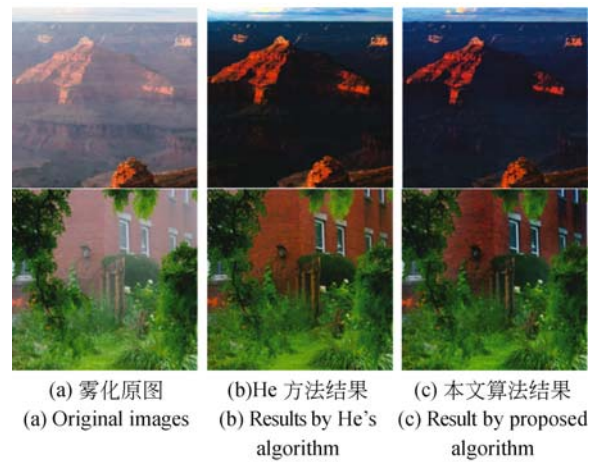


图 6 He 方法和本文方法处理效果对比

Fig. 6 Comparison between He's algorithm and proposed algorithm

表 2 灰度均值和方差结果

Tab. 2 Grayscale mean values and variances

—	雾化原图(1)			He 方法去雾图(1)			本文算法去雾图(1)		
	R	G	B	R	G	B	R	G	B
均值	141.66	140.11	148.5	44.08	44.01	54.61	39.63	47.3	73.44
方差	37.72	35.92	37.48	59.94	52.81	55.94	44.93	38.66	45.73
二	雾化原图(2)			He 方法去雾图(2)			本文算法去雾图(2)		
	R	G	B	R	G	B	R	G	B
均值	96.26	125.03	91.63	69.82	93.75	50.68	57.13	88.26	45.55
方差	55.54	35.63	44.83	45.66	36.3	22.71	42	40.22	29.18

4 天空区域处理

4.1 大气环境光的提取

由雾化图像的物理模型可知,雾气越浓或是场景越远的区域,其大气环境光的渗入量越多,因此无穷远或雾气过浓以致透射率接近零的图像区域可视为只有大气环境光成分,表现在暗原色图上是该区域呈现较明亮的状态。这一信息可用来定位大气环境光所在的位置区域。本文获取环境光的步骤为:

(1) 在暗原色图中检索出最明亮的前 100 pixel,并标记这些像素的位置。

(2) 从雾化原图相应像素点的位置,提取出这些像素的颜色值。

(3) 对所获取颜色值的 RGB 三通道分别排序,取各自的最大值作为大气环境光的颜色值。

4.2 天空区域的处理

上述 1.4 的实验结果显示,传统的暗原色去雾方法用于处理含有天空区域的雾化图像时效果并不理想,这是由于传统方法对天空区域不适用。上文已分析了其成因,于此不再赘述。在去雾过程中,大气光所在像素点的颜色值并没有发生变化,而天空区域是无穷远的区域,该区域的像素具有亮白特性,其颜色值也很接近大气光的颜色值,该区域的光成分只有大气环境光,不包含场景信息,其经过去雾处理后,颜色值发生了较大的变化,与环境大气光的差异变大,这种处理反而改变了天空区域的原有状态,故该区域不必经过式(6)处理,只要识别出来原值保留即可。下一个关键

点在于如何分割出天空区域,以及如何评判是否有天空区域。本文采取的方法如下:

(1)按照公式(12)定义的规则寻找满足天空区域集定义的像素点。

(2)统计步骤(1)寻找到的满足天空区域定义的像素点的数目,计算这些像素数量占雾化原图总像素数量的比重。设定一个比重阈值 V , 本文取为 $0.10 \sim 0.20$ 。如果计算出的比重大于设定的比重阈值 V , 则认为雾化图像有天空区域,反之,则认为没有天空区域。

$$S = \{J \mid J^r - A^r \leq \gamma, J^g - A^g \leq \gamma, J^b - A^b \leq \gamma\}. \quad (12)$$

式(12)中的 S 代表天空区域集; J 为天空区域中的像素点; γ 为界定天空区域像素点的容差系数,本文中其取值为 $20 \sim 35$ 。

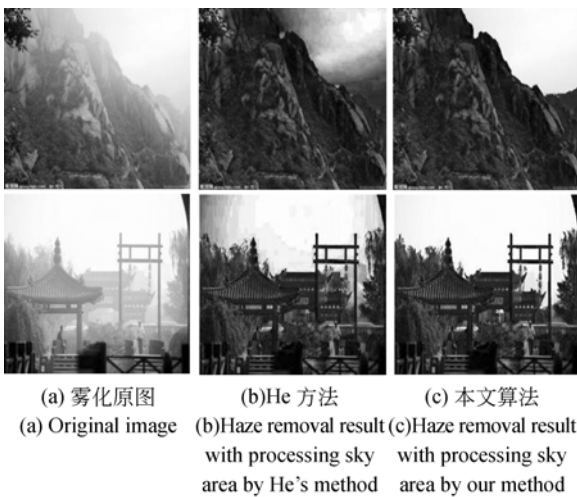


图7 He方法和本文方法处理天空区域效果对比
Fig. 7 Comparison results of sky area processed by He's algorithm and proposed algorithm

如果认为雾化图像没有天空区域,则按照公式(6)进行去雾处理;若判定有天空区域时,将天空区域分割出来,并对该区域保留颜色原值,其它区域按照公式(6)进行处理。处理效果如图7所示。相对于图7(b),图7(c)中由于天空区域的改善显著地提高了整幅图像的视觉效果。需要说明的是在天空区域与场景的交界处,该方法的处理效果欠佳。

5 结论

基于暗原色信息的去雾方法会导致图像景边缘处产生白色晕块,软抠图法采用修复透射率消除这些白色晕块时取得了良好的效果,但耗费了大量的时间和巨大的内存资源。为了既能够有效去除白色晕块又能够降低修复透射率的处理时间,本文在分析最小滤波和引导滤波单独用于修复透射率的优缺点后,采用最小滤波和引导滤波相结合的方法来修复透射率。该方法综合了两者的优点,同时又弥补了各自的不足。较之于软抠图法,虽然在效果上并未显示出优越性,但消除白色晕块的效果也是显著易见的,并且大大地降低了处理时间,提高了处理效率。另一方面,传统的暗原色去雾方法在处理天空区域时,实际效果并不理想,甚至有些糟糕。本文提出了一种评判雾化原图是否有天空区域的方法,对天空区域的雾化图,将其中的天空区域像素识别出来予以颜色原值保留处理,从整体上改善了去雾复原图的视觉效果,提高了图像的质量。在此需说明一点,文中用以实验的雾化原图皆来自百度网站或摘自其它文献。

参考文献:

- [1] NARASIMHAN S G, NAYAR K. Vision and the Atmosphere [J]. *International Journal of computer Vision*, 2002, 48(3):233-254.
- [2] NARASIMHAN S G, NAYAR K. Contrast restoration of weather degraded images [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2006, 25(6):713-724.
- [3] NARASIMHAN S G, NAYAR K. Vision in Bad weather [C]. *The Proceedings of the Seventh IEEE International Conference on Computer Vision*, 1999, 2:820-827.
- [4] TAN R. Visibility in bad weather from a single image [J]. *IEEE Conf. Computer Vision and Pattern Recognition*, 2008.
- [5] FATTAL R. Single image dehazing [C]. *Proceeding in SIGGRAPH08 ACM*, 2008.
- [6] HE K, SUN J, TANG XO. Single image haze removal using dark channel prior [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2011, 12(33):2341-2353.

- [7] 刘楠,程咏梅,赵永强. 基于加权暗通道的图像去雾方法[J]. 光子学报, 2012, 41(3): 320-325.
LIU N, CHENG Y M, ZHAO Y Q. An image dehazing method based on weighted dark channel prior [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, 41(3): 320-325 (in Chinese).
- [8] 唐鉴波,江铁,王田. 基于引导滤波的单幅图像去雾算法的研究[J]. 科学技术与工程, 2013, 13(11): 3021-3025, 3042.
TANG J B, JIANG T, WANG T. Research on single image dehazing using guided filtering [J]. *Science Technology and Engineering*, 2013, 13(11): 3021-3025, 3042 (in Chinese).
- [9] TAREL J P, HAUTIERE N. Fast visibility restoration from a single color or gray level image [C]. *IEEE 12th International Conference on Computer Vision (ICCV)*, 2009: 2201-2208.
- [10] 郭珈,王孝通,胡程鹏,等. 基于单幅图像景深和大气散射模型的去雾方法[J]. 中国图像图形学报, 2012, 17(1): 27-32.
GUO J, WANG X T, HU CH P, *et al.*. Single image dehazing based on scene depth and physical model [J]. *Journal of Image and Graphics*, 2012, 17(1): 27-32.
- [11] HE K M, SUN J, TAND X O. Guided image filtering [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2013, 35(6): 1397-1409.
- [12] PEDONE M, HEIKKIL J. Robust airlight estimation for haze removal from a single image [C]. *IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops (CVPRW)*, 2011: 90-96.
- [13] 嵇晓强,戴明,尹传历,等. 航拍降质图像的去雾处理[J]. 光学精密工程, 2011, 19(7): 1659-1668.
JI X Q, DAI M, YIN CH L, *et al.*. Haze removal for aerial degraded images [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(7): 1659-1668 (in Chinese).
- [14] 尹传历,孙丽娜,韩松伟,等. 基于暗原色先验的嵌入式图像增强系统[J]. 液晶与显示, 2011, 26(5): 673-676.
YIN CH L, SUN L N, HAN S W, *et al.*. Embedded image enhancement system based on dark channel prior [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2011, 26(5): 673-676.
- [15] 张绍阳,解源源,张鑫,等. 基于分数阶微分的模糊交通视频图像增强[J]. 光学精密工程, 2014, 22(3): 779-786.
ZHANG SH Y, XIE Y Y, ZHANG X, *et al.*. Enhancement of fuzzy traffic video images based on fractional differential [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(3): 779-786 (in Chinese).

作者简介:

✘ 王卫星(1959—),男,湖南人,博士,教授,博士生导师,1982年和1985年分别在国内获得学士学位和工程硕士,1997年在瑞典皇家工学院获得博士学位,主要从事图像处理、模式识别和机器视觉等研究方向。
E-mail: znm525d@qq.com



肖翔(1990—),男,江西南昌人,2015年在福州大学物理与信息工程学院年获得硕士学位,主要研究方向为图像处理及模式识别。E-mail: jg-sxx8513@163.com



陈良琴(1980—),女,福建人,博士研究生,2002年,2005年于福州大学分别获得学士、硕士学位,主要研究方向为图像处理及模式识别。E-mail: odiechen@fzu.edu.cn