

# 一种快速的单幅图像去雾算法

刘杰平, 黄炳坤, 韦 岗

(华南理工大学电子与信息学院, 广东广州 510640)

**摘 要:** 为了解决基于暗原色先验的单幅图像去雾算法运行效率低, 以及去雾后在图像的明亮灰白区域存在图像色彩失真的问题, 提出一种快速有效的单幅图像去雾算法. 该算法基于 HSI 色彩空间进行粗略的透射率以及大气光的估计; 然后, 用导向滤波对粗略的透射率进行平滑, 再利用阈值法对灰白明亮区域的透射率进行修正, 得到最终的透射率; 最后, 进行色彩调整得到复原图像. 实验结果表明, 本文算法具有很高的运行效率, 能有效提高复原图像的清晰度和对比度.

**关键词:** 图像去雾; 暗原色先验; HSI 色彩空间; 大气散射模型

**中图分类号:** TP391.4      **文献标识码:** A      **文章编号:** 0372-2112 (2017)08-1896-06

**电子学报 URL:** <http://www.ejournal.org.cn>      **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2017.08.013

## A Fast Effective Single Image Dehazing Algorithm

LIU Jie-ping, HUANG Bing-kun, WEI Gang

(School of Electronic and Information Engineering, South China University of Technology, Guangzhou, Guangdong 510640, China)

**Abstract:** A fast and effective single image dehazing algorithm is proposed in order to solve the problems of low efficiency and the color distortion of the bright grey areas after dehazing algorithm of using dark channel prior. First, the algorithm estimates the rough transmittance and the atmospheric light based on HSI color space. Then, the final transmittance is generated after smoothing the rough transmittance by guided filter and correcting the transmittance of the bright grey areas by a threshold method. Finally, tone mapping are used to get the restored image. Experiments show that the proposed algorithm has high efficiency, which can effectively improve the visibility and contrast of the restored image.

**Key words:** image dehazing; dark channel prior; HSI color space; atmospheric scattering model

### 1 引言

近年来, 由于环境的恶化, 部分地区出现了雾霾天气. 雾霾的存在会吸收和散射光线, 使能见度恶化, 导致图像中目标的对比度降低、饱和度下降和色调偏移, 影响观察者的视觉感受, 妨碍图像信息的获取, 从而直接影响户外监控系统效用的发挥. 因此, 雾天图像的清晰化处理具有十分重要的意义.

目前, 国内外学者对去雾算法的研究主要集中在单幅图像的去雾, 单幅图像去雾方法获得了重大进展<sup>[1-4]</sup>. Tan<sup>[5]</sup>基于无雾图像对比度较雾天图像的高, 通过提高图像的局部对比度来复原图像. 但没有从物理模型上求解真实场景的反射率, 复原图像的颜色过饱和, 并且在景深不连续的地方会产生 Halo 效应. Fat-

tal<sup>[6]</sup>假设在局部范围内透射率和表面投影是不相关的, 利用独立成份分析估计场景反射率. 但该方法基于颜色统计, 无法处理灰度图像和浓雾图像. He 等<sup>[7]</sup>通过对大量户外无雾图像的研究, 提出了暗原色先验理论, 基于该理论估计透射率, 并借助软抠图算法细化透射率, 能够较好地复原图像, 但时间复杂度高; 采用导向滤波<sup>[8]</sup>提高了图像复原速度, 但滤波器参数设置不恰当时, 容易引起 Halo 效应. Tarel 等<sup>[9]</sup>利用中值滤波的变形形式对大气耗散函数进行估计. 由于没有严格估计大气光强度值, 使复原图像整体偏暗, 且引入色调调整参数后, 容易引起颜色失真和 Halo 效应. Liu 等<sup>[10]</sup>结合暗原色先验和 Retinex 理论对单幅图像进行去雾, 对有空天区域的雾天图像取得了较好的去雾效果, 但是整体色彩偏暗.

收稿日期: 2016-01-20; 修回日期: 2016-05-18; 责任编辑: 蓝红杰

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 61327005); 国家工程技术研究中心项目 (No. 2013FU125X02); 广东省短距离无线探测与通信重点实验室项目 (No. 2014B030301010)

针对去雾算法色彩失真和运行效率不高的问题,本文提出一种快速单幅图像去雾算法.该算法基于更适合人眼视觉特性的 HSI 色彩空间估计大气光和透射率,仿真实验验证了本文算法的有效性.

## 2 HSI 色彩空间图像退化模型

光经过大气粒子散射后,对观测点所观测到的光强的影响可以用大气散射模型<sup>[11,12]</sup>表示为:

$$F(x) = Z(x)t(x) + A(1 - t(x)) \quad (1)$$

其中,  $F$  为观测点接收到的点光强(即输入的有雾图像);  $Z$  为无雾天气观测点接收到的点光强(即无雾图像);  $A$  是无穷远处的大气光,  $t$  是光线传输透射率.

从式(1)可知,只要正确估计  $A$  和  $t$  就可求得无雾图像.文献[11,12]的研究表明,式(1)散射模型适用于黑白图像和 RGB 彩色图像.

虽然 RGB 色彩空间能较好匹配人眼对红色、绿色和蓝色光波的感应特性,但是,人们观察彩色物体时,往往倾向于用色调、色饱和度和亮度描述物体,HSI 色彩空间更符合于人眼观察外界事物的视觉特性,因此,本文算法基于 HSI 色彩空间进行图像去雾处理.根据 RGB 色彩空间和 HSI 色彩空间的转换关系,以及大气散射模型式(1),可以得到 HSI 色彩空间的图像退化模型如下:

$$\begin{cases} H_F(x) = H_Z(x) \\ S_F(x) = t(x) \frac{I_Z(x)}{I_F(x)} S_Z(x) \\ I_F(x) = I_Z(x)t(x) + A_l(1 - t(x)) \end{cases} \quad (2)$$

其中,  $H_F$ 、 $S_F$ 、 $I_F$  分别表示雾天图像的 HSI 色彩空间模型,  $H_Z$ 、 $S_Z$ 、 $I_Z$  分别表示无雾图像的 HSI 色彩空间模型,  $A_l$  表示亮度通道的大气光.由公式(2)可以推导出:

$$G_F(x) = G_Z(x)t(x) + A_l(1 - t(x)) \quad (3)$$

其中  $G_F = I_F(x)(1 - S_F(x))$ 、 $G_Z = I_Z(x)(1 - S_Z(x))$ .显然,式(3)与大气散射模型公式(1)具有类似的形式.

## 3 本文算法

文献[7]研究表明,在 RGB 色彩空间,暗原色存在于以下场景中:(1)建筑物或景物的阴影;(2)颜色鲜艳的景物或者植物;(3)颜色暗淡的物体表面.因此,在 HSI 色彩空间,暗原色可以表述为亮度值很低或者饱和度值很高,可以写成:

$$\begin{aligned} \min_{y \in \Omega(x)} (\min(1 - S_Z(y), I_Z(y))) \rightarrow 0 \quad \text{即;} \\ \begin{cases} \min_{y \in \Omega(x)} (1 - S_Z(y)) \rightarrow 0, & (1 - S_Z(y) \leq I_Z(y)) \\ \min_{y \in \Omega(x)} (I_Z(y)) \rightarrow 0, & (1 - S_Z(y) > I_Z(y)) \end{cases} \end{aligned}$$

综上所述,HSI 色彩空间的暗原色可以表示为:

$$\min_{y \in \Omega(x)} (G_Z(y)) \rightarrow 0 \quad (4)$$

### 3.1 大气光估计

大气光是天空或者浓雾区域亮度的最大值,通常假设大气光是均匀的.文献[7]对于含有大面积天空区域或者白色物体较小的雾天图像都能得到比较准确的大气光估计,但是当滤波尺寸大于图像的天空区域或者小于白色物体的时候,就会产生一定的误差.公式(3)的模型具有暗原色先验的规律,该模型的雾天图像的区域最小滤波后的图像也可以看作是雾浓度的粗略近似.因此,本文先对公式(3)的模型做区域最小滤波,再对滤波的结果进行开运算,去除白色物体的影响;然后,取亮度最大的前 0.1% 的像素作为一个集合,认为集合中的这些像素都是处在天空或者浓雾区域的;最后,根据集合中这些像素空间的位置,从有雾图像中寻找与这些像素空间位置对应的 RGB 各个通道的像素集合,将各个通道对应像素集合的最大值作为 RGB 各个通道对应的大气光  $A_c$ ,  $c \in \{r, g, b\}$ .亮度通道的大气光可以认为是 RGB 三通道的大气光的平均值,即:

$$A_l = \text{mean}(A_c), c \in \{r, g, b\}$$

### 3.2 透射率估计

对公式(3)进行区域最小滤波,可以得到:

$$\min_{y \in \Omega(x)} (G_F(y)) = \min_{y \in \Omega(x)} (G_Z(y))t(x) + A_l(1 - t(x)) \quad (5)$$

其中,  $\Omega(x)$  表示以  $x$  为中心的局部区域.

假设透射率具有局部区域一致性,由公式(4)和(5)可以得到透射率的表达式:

$$t(x) = 1 - \frac{\min_{y \in \Omega(x)} (G_F(y))}{A_l} \quad (6)$$

现实中,即使是晴朗的天气,大气中也不可能不包含任何粒子,在观看远处的物体时,雾依然存在,即存在空间透视现象.如果彻底去除雾会使图像看起来不真实,且图像深度感会丢失.因此,在公式(6)中引入一个常量  $\omega$  ( $0 < \omega < 1$ ),则公式(6)可以写成:

$$t(x) = 1 - \omega \frac{\min_{y \in \Omega(x)} (G_F(y))}{A_l} \quad (7)$$

这一修正的好处是:可以保留一部分覆盖在远处物体的雾,使复原图像的效果更真实、更符合人眼特性.  $\omega$  的取值是基于应用的,本文中固定取值为 0.95.

### 3.3 透射率细化与修正

在透射率估计中,采用的是区域最小滤波,滤波后的图像存在块效应.同样的,估计得到的粗略透射率也具有块效应.然而透射率包含的深度信息应该是分段平滑的,因此,本文使用导向滤波器<sup>[8]</sup>对透射率进行平滑处理,导向滤波器是引导图  $I_F$  与滤波结果  $t_1$  的局部线性变换:

$$t_1(y) = a_k I_F(y) + b_k, \forall y \in w_k \quad (8)$$

其中  $a_k$  和  $b_k$  是窗口  $w_k$  中的线性变换系数,通过代价函数  $E(a_k, b_k) = \sum_{y \in w_k} ((a_k I_F(y) + b_k - t(y))^2 + \varepsilon a_k^2)$  最小化,使导向滤波器的输出与输入差异最小,  $\varepsilon$  是防止  $a_k$  过大的正则化参数. 因此  $t_1$  保留了  $t$  的总体特征,同时具有引导图的细节变化. 经过导向滤波后的透射率  $t_1$  比公式(7)估计得到的透射率  $t$  更加平滑、细腻,同时消除了块效应,场景深度发生突变部分的边缘更加清晰.

当场景物体与大气光的强度接近时(如灰白明亮区域、天空区域),上述方法得到的透射率是错误的,导致复原图像在这些区域会出现色彩失真,因此,需要对这些区域进行透射率修正<sup>[13]</sup>:

$$t_2(x) = \begin{cases} t_1(x), & |A_l - G_F(x)| > K \\ \frac{K}{|A_l - G_F(x)|} t_1(x), & |A_l - G_F(x)| \leq K \end{cases} \quad (9)$$

其中,  $K$  是判断灰白明亮区域的阈值,当  $G_F(x)$  小于或等于  $A_l$  的时候,认为这些区域是灰白明亮区域,对这些区域进行透射率修正;当  $G_F(x)$  大于  $A_l$ ,认为这些区域不是灰白明亮区域,这些区域不需要进行透射率修正.

因为透射率值应该在  $(0, 1)$  范围内,根据公式(9)得到的透射率值有些会大于 1,另外,透射率应该大于 0.1,因此,本文对透射率  $t_2$  进行调整:

$$t_3(x) = \min\{\max[t_2(x), 0.1], 1\} \quad (10)$$

### 3.4 复原图像和色彩调整

根据估计的大气光和透射率,从公式(1)可以得到复原图像:

$$Z_c(x) = \frac{F_c(x) - A_c}{t_3(x)} + A_c \quad (11)$$

通过公式(11)得到的复原图像偏暗,因此,需要进行色彩调整,提高图像质量.

首先,为了防止公式(11)结果中负数对于色彩映射的影响,将公式(11)复原图像中小于 0 的值置 0;然后,采用 Drago 等<sup>[14]</sup>人提出的色彩映射方程进行色彩调整,对于复原图像 RGB 每个通道进行如下操作:

$$Z_d(x) = \frac{L_{d\max} \cdot 0.01}{\log_{10}(Z_{c\max} + 1)} \cdot \frac{\log(Z_c(x) + 1)}{\log\left(2 + \left[\frac{Z_c(x)}{Z_{c\max}}\right]^{\frac{\log(b)}{\log(0.5)}}\right)} \cdot 8 \quad (12)$$

其中,  $Z_d$  是经过色彩调整后的图像;  $Z_{c\max}$  ( $c \in \{r, g, b\}$ ) 表示对应通道的最大值;  $L_{d\max}$  是显示设备能够显示的最大亮度值,通常取 100;  $b$  为偏置参数,它决定了较暗区域细节可见度以及高强度值被压缩的程度.

## 4 实验结果与分析

为了验证本文算法的有效性,在 Windows7 操作系统、Intel(R) Core(TM) i5 CPU@3.00GHz、4GB 内存的 PC 机上,用 Matlab R2012a 进行仿真实验,分别采用 He 算法<sup>[8]</sup>、Tarel 算法<sup>[9]</sup>和 Liu 算法<sup>[10]</sup>与本文提出的去雾算法进行对比. 实验选择具有代表性的 30 幅典型图像:包含天空区域的城市、天安门等 16 幅图像和不包含天空区域的田野、火车等 14 幅图像. 本文算法对于包含天空区域的图像,  $K$  值取为 0.2,不包含天空区域的图像,  $K$  值取为 0;区域大小为  $15 \times 15$ ;采用平均梯度、信息熵、标准差、可见边之比  $e$ <sup>[15]</sup>和可见边的规范化梯度均值  $\bar{r}$ <sup>[15]</sup>作为评价图像复原质量的客观指标.

在复原图像主观质量方面,图 1 给出了 8 幅图像采用四种去雾算法的复原图像,其中包含天空区域和不包含天空区域的图像各 4 幅. 从图 1 可见,不考虑天空区域时,所有算法都能够有效地去雾,提高了雾天图像的饱和度、对比度和清晰度,复原后的图像都有比较好的视觉效果;四种算法比较而言,He 算法复原后的图像整体偏暗. 对于包含天空的图像,He 算法复原的图像,在天空区域含有较大纹理和分块现象,而且天空出现了明显的色彩失真;Tarel 算法复原图像的天空区域比较平滑,但是色彩严重失真;Liu 算法对天空区域复原效果比较好,但前景整体色彩偏暗,有些区域色彩失真;本文算法复原图像的天空区域既没有明显的纹理也没有分块现象,基本上还原出了真实的天空,图像清晰度高,细节明显清晰,无色彩失真,与其它三种算法比较视觉效果更好.

在复原图像客观质量方面,表 1 给出了四种去雾算法复原图像的客观质量比较,从表 1 可以看出,本文算法的平均梯度、信息熵、标准差大部分比 He 算法和 Tarel 算法高,表明了本文算法相对这两种经典算法去雾结果的信息量更大、图像更加清晰;与 Liu 算法相比,本文算法信息熵和标准差相对较大,而平均梯度相对较小,这是因为 Liu 算法复原的图像边缘色彩过饱和. 比较可见边之比  $e$  和可见边的规范化梯度均值  $\bar{r}$  两个指标,对于不包含天空区域的田野和火车图像, Tarel 算法的这两个指标都是最大的,本文算法好于 He 算法,表明本文算法较 He 算法具有更多的可见边,能见度大;对于包含天空区域的城市和天安门图像, Liu 算法的  $e$  最大,本文算法的  $\bar{r}$  最大,这是因为 Liu 方法复原的图像色彩过饱和,细节丰富,可见边数量增多.

综合四种去雾算法复原图像的主客观质量,实验结果表明了本文算法的有效性,这主要是因为,本文算法中基于 HSI 色彩空间进行粗略的透射率以及大气光的估计, HSI 色彩空间更适合人眼的视觉特性.

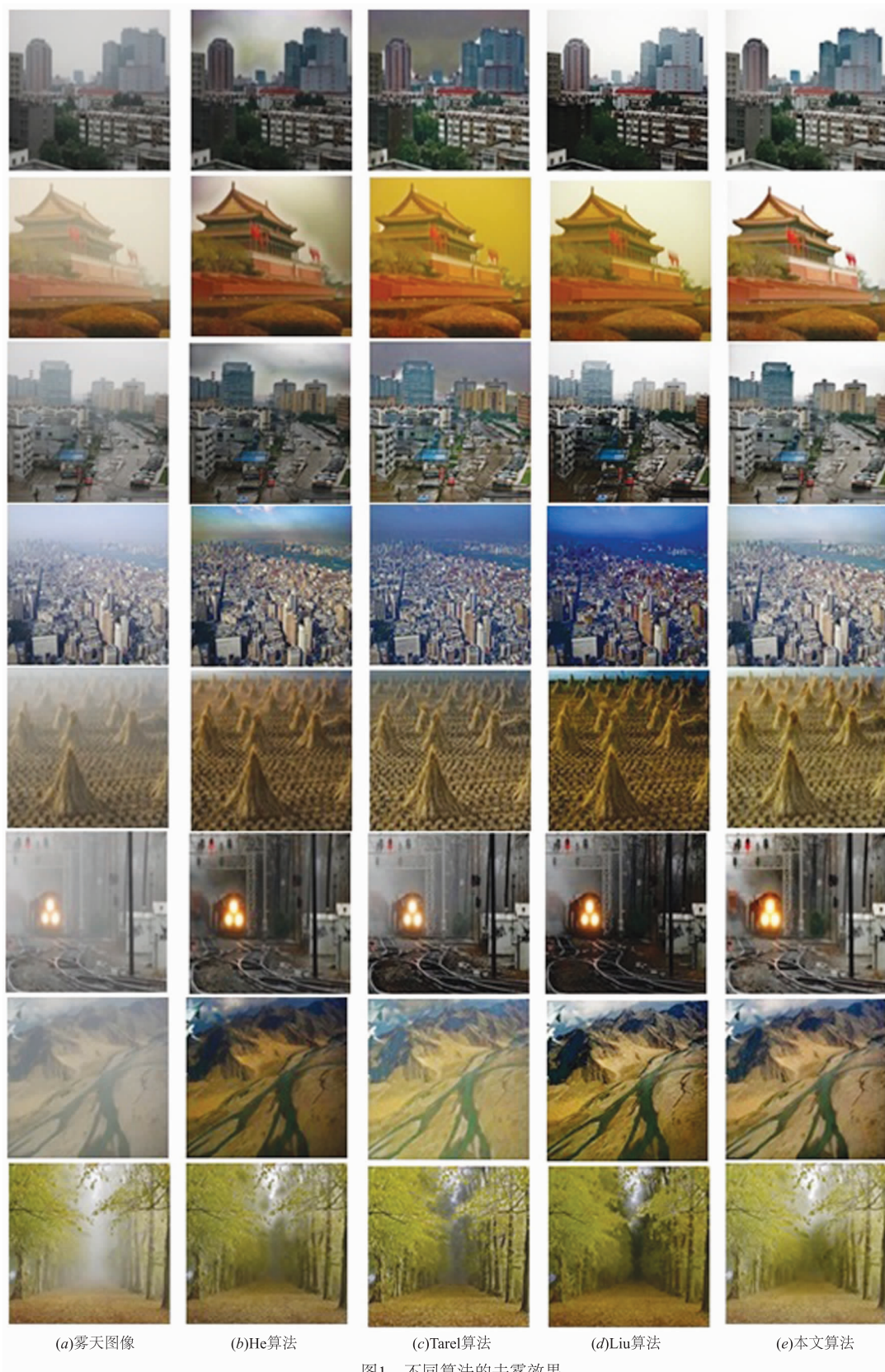


表 1 不同去雾算法的复原图像质量客观指标比较

图像	算法	平均梯度	信息熵	标准差	$e$	$\bar{r}$
城市	He	7.7049	7.4540	55.6053	0.043	1.260
	Tarel	11.5090	7.0853	39.5974	0.165	2.061
	Liu	<b>16.0868</b>	7.2070	<b>93.7775</b>	<b>0.233</b>	2.201
	本文算法	11.0485	<b>7.4958</b>	82.4332	0.010	<b>2.216</b>
天安门	He	5.6492	<b>7.4361</b>	54.5975	0.524	1.570
	Tarel	6.2018	6.8558	39.3591	0.520	1.946
	Liu	7.1862	6.9535	72.1367	<b>0.553</b>	2.125
	本文算法	<b>7.5473</b>	7.2709	<b>80.6296</b>	0.459	<b>2.204</b>
田野	He	10.8798	6.7897	29.8395	0.209	1.571
	Tarel	17.3918	6.9318	30.8585	<b>0.277</b>	<b>2.459</b>
	Liu	<b>19.4559</b>	6.553	36.9295	0.121	2.399
	本文算法	14.8917	<b>7.1296</b>	<b>37.2752</b>	0.217	2.161
火车	He	7.0316	6.8934	36.1291	1.244	1.820
	Tarel	10.3229	6.9592	33.3404	<b>1.470</b>	<b>2.946</b>
	Liu	<b>11.5705</b>	6.8017	47.1301	1.444	2.612
	本文算法	10.3660	<b>7.4278</b>	<b>48.3043</b>	1.259	2.788

在算法复杂度方面,表 2 给出了本文算法和其它三种去雾算法的运算时间,从表 2 可以看出,与其它三种算法比较,本文算法耗时最少,运算速度最快,分别比 He 算法、Tarel 算法和 Liu 算法平均快 3.508 秒、4.82 秒和 2.003 秒。这是因为,对于一幅大小为  $s_x \times s_y$  的图像, Tarel 算法的时间复杂度为  $O(s_x s_y s_p^2 \ln s_p)$ , 其中  $s_p$  为中值滤波的模版尺寸,在 Tarel 算法中,中值滤波的窗口半径一般取的比较大,本文实验中取 41; He 算法、Liu 算法和本文算法的时间复杂度都是  $O(s_x s_y)$ , 它是图像像素数的线性函数,具有很高的执行效率。但是, Liu 算法使用了联合双边滤波, He 算法和本文算法采用的是导向滤波,导向滤波运算效率比联合双边滤波高。另外,本文算法只需要做两次最小值滤波,而 He 算法的暗原色先验需要做四次最小值滤波。综合上述原因,本文算法相对其它算法运算时间更短、效率更高。

表 2 不同去雾算法的运算时间(秒)比较

算法	城市	天安门	田野	火车
He	6.85	8.00	5.22	6.79
Tarel	8.79	10.08	4.30	8.92
Liu	5.44	5.94	4.19	5.27
本文算法	3.18	3.84	2.58	3.23

为了更进一步评估本文算法的复杂度,选择 10 种不同分辨率(像素数目)、每种分辨率有 3 幅图像(每种分辨率的运行时间是 3 幅图像的平均运行时间),共计 30 幅雾天图像,进行去雾实验,图 2 给出了四种去雾算

法的运行时间,从图 2 可见,随着图像像素数目的增大,四种去雾算法的运行时间增加,且 Tarel 算法的运行时间显著增加,与 He 算法、Tarel 算法和 Liu 算法相比,本文算法的运行时间最短。

综上,兼顾算法复杂度和去雾效果两个方面,本文算法相对文中比较的算法来说,优势比较大。

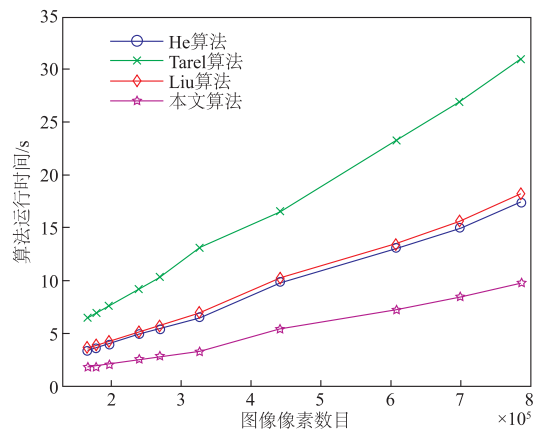


图 2 四种去雾算法运行时间比较

## 5 结论

本文提出一种快速有效的单幅图像去雾算法,提高了基于暗原色先验的单幅图像去雾算法运行效率低以及明亮灰白区域去雾后的色彩失真问题。在 HSI 色彩空间进行粗略的透射率以及大气光的估计;用导向滤波平滑粗略的透射率,消除块效应;并对灰白明亮区域的透射率进行了修正。通过对复原图像的色彩调整,改善了暗原色去雾在灰白明亮区域的颜色失真现象。实验结果表明,本文算法去雾效果好,复原图像细节丰富、自然逼真,同时减少了去雾算法的运行时间。

## 参考文献

- [1] 郭璠,唐斌,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 Fan, TANG Jin, CAI Zi-xing. Single image defogging based on fusion strategy[J]. Journal on Communications, 2014, 35(7): 199-207. (in Chinese)
- [2] Lai Y H, Chen Y L, Chiou C J, et al. Single image dehazing via optimal transmission map under scene Priors[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2015, 25(1): 1-14.
- [3] 何林远,毕笃彦,熊磊,等. 基于亮度反馈的彩色雾霾图像增强算法[J]. 电子学报, 2015, 43(10): 1978-1983.  
HE Lin-yuan, BI Du-yan, XIONG Lei, et al. Color image haze removal algorithm based on luminance feedback[J]. Acta Electronica Sinica, 2015, 43(10): 1978-1983. (in Chinese)

- [4] Wang D, Zhu J B. Fast smoothing technique with edge preservation for single image dehazing[J]. IET Computer Vision, 2015, 9(6): 950 – 959.
- [5] Tan R T. Visibility in bad weather from a single image [A]. Proceeding of the IEEE CVPR [C]. USA: IEEE, 2008. 1 – 8.
- [6] Fattal R. Single image dehazing[J]. ACM Transactions on Graphics, 2008, 27(3): 1 – 9.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] Tarel J, Hautière N. Fast visibility restoration from a single color or gray level image[A]. Proceeding of IEEE CVPR [C]. USA: IEEE, 2009. 2201 – 2208.
- [10] 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.  
LIU Hai-bo, YANG Jie, WU Zheng-ping, 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. (in Chinese)
- [11] Narasimhan S G, Nayar S K. Vision and the atmosphere [J]. International Journal of Computer Vision, 2002, 48(3): 233 – 254.
- [12] Narasimham 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] 蒋建国, 侯天峰, 齐美彬. 改进的基于暗原色先验的图像去雾算法[J]. 电路与系统学报, 2011, 16(2): 7 – 12.  
JIANG Jian-guo, HOU Tian-feng, QI Mei-bin. Improved algorithm on image haze removal using dark channel prior[J]. Journal of Circuits and Systems, 2011, 16(2): 7 – 12. (in Chinese)
- [14] Drago F, Myszkowski K, Annen T, et al. Adaptive logarithmic mapping for displaying high contrast scenes[J]. Computer Graphics Forum, 2003, 22(3): 419 – 426.
- [15] Hautière N, Tarel J P, Aubert D, et al. Blind contrast enhancement assessment by gradient ratioing at visible edges [J]. Image Analysis & Stereology, 2008, 27(6): 87 – 95.

#### 作者简介



刘杰平 女, 1961 年生, 湖南新化人. 华南理工大学副教授、硕士生导师. 研究方向为图像/视频信号处理.

E-mail: eeliujp@scut.edu.cn



黄炳坤 男, 1992 年生于广东罗定. 华南理工大学电子与信息学院硕士研究生, 研究方向为图像去雾算法.

E-mail: olivernewhbk@hotmail.com