

## 景深边缘优化的暗通道去雾算法

李可 刘辉 汪丹 周威

(湖南师范大学 物理与信息科学学院 长沙 410006)

**摘要:** 雾天条件下拍摄的图像存在低对比度和低场景可见度的问题,传统的去雾算法容易产生 Halo 效应。为此,提出了景深边缘优化的暗通道去雾算法。该算法是基于暗原色先验理论,需要考虑消除景深边缘处的白色晕块,方法是对图像景深边缘和非景深边缘分别采用不同的模板处理得到透射图。引导滤波修复透射图,在去除多余的纹理信息的同时增强了雾天图像的边缘信息。并采用新增可见边之比、梯度化均值对去雾图像进行客观评价。实验表明该算法不仅能够有效地去除图像中的雾气,而且有效地降低了 Halo 效应,从整体上改善了去雾复原图像的视觉效果。

**关键词:** 去雾;暗原色先验;透射率;引导滤波;Halo;图像增强

**中图分类号:** TN918.81 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 520.6040

## Dark channel prior dehazing algorithm based on depth-edges optimization

Li Ke Liu Hui Wang Dan Zhou Wei

(College of Physics and Information Science, Hunan Normal University, Changsha 410006, China)

**Abstract:** A foggy image has low contrast and low visibility. Traditional dehazing algorithms suffer from the halo phenomenon. So I proposed a new dark channel prior algorithm based depth-edge. When a fast haze-removal algorithm based on the theory of dark channel prior, it should take the elimination of white halo on the depth-edges. We estimate the transmission map through processing the depth-edges and non depth-edges respectively with different neighborhoods. Guide filtering is adopted to modify the transmittance. It removes redundant texture information and brings the depth edge information. Compared by rate of new visible edges and mean ration of the gradient at visible edges. Presented method processes the fog image effectively the visual effect of the haze-free image and it eliminates the halo. The visual effect of whole defogging restored image could be improved.

**Keywords:** haze-removal; dark channel prior; transmission; guided filtering; Halo; imaging enhancement

## 1 引言

环境污染越来越严重,大气环境的严重破坏也给交通带来压力,能见度降低,雾霾天气下容易造成交通事故的发生。因为大多数的室外视频工作系统,如视频监控、自动驾驶等,都需要清晰、准确地提取图像的有效特征。但是,在雾霾天气下造成环境的能见度降低,图像中目标对比度、颜色等特征遭到衰减,更严重的是自动驾驶汽车的系统性能往往受到很大影响,降低其优良的性能。由于雾天给人们的出行带来不便,因此有必要消除图像中雾气对场景目标造成的不利影响。

研究最多的是基于物理模型的雾天图像复原算法,包括 He 等人<sup>[1]</sup>的基于暗通道先验的去雾算法和 Fattal<sup>[2]</sup>的基于大气耗散函数的去雾算法、Tan<sup>[3]</sup>的最大化复原图像对比度的去雾算法等。图像复原去雾算法是从图像的降质

模型出发,根据不同图像模糊成因,构造不同的模型,进而复原出清晰的图像,文献[4]提出的改进的基于大气光幕单幅图像去雾算法是一种物理模型去雾。基于物理模型的去雾效果明显,接近真实的自然场景,可以根据需要复原出局部重要的信息。

目前 He 等人的去雾算法被广泛应用,但是该算法容易产生 Halo 效应,影响图像的去雾效果。Tarel 的基于大气耗散函数去雾算法首先对有雾图像进行白平衡操作,使雾显示为纯白色,也就是大气散射模型式中的大气光值为 1。再假设大气耗散函数在局部的变化是平缓的,因此采用中值滤波代替 He 的算法中的最小值滤波来对介质透射系数进行估计,试图从整体上降低 Halo 效应。但是中值滤波不能很好的保持图像的边缘,且不同的图像对参数的设置要求不同。文献[5]对粗略透射图进行最大值滤波,达到降低 Halo 效应的目的。但是这个算法是对整体的透射率

收稿日期:2016-07

进行修复,降低 Halo 效应的同时,增大了图像的整体透射率,而且没有保持图像的边缘。刘红平等<sup>[6]</sup>利用中值滤波对暗原色先验算法进行重新定义,消除 Halo 效应;利用均值滤波对上述结果进行二次滤波,提高透射率的估算精度以及恢复图像的亮度。该算法简单,时间耗损度低,可有效提高场景的对比度和清晰度,且对天空区域的颜色具有很好的恢复性。文献<sup>[7]</sup>针对暗原色先验去雾算法对明亮区域失效,以及分块求取暗原色存在的 Halo 效应现象,提出了一种基于自适应参数的全局暗原色先验去雾算法。该算法采用全局暗原色操作取代分块处理,并通过模糊逻辑控制器自适应估计明亮区域的容差参数和透射率调整因子;在非明亮区域求取大气光强度后,根据自适应容差纠正明亮区域被错误估计的透射率,达到降低 Halo 效应的目的。

本文提出了基于暗原色先验原理,求暗图像时,对图像景深边缘和非景深边缘分别采用不同的模板进行暗图像的求解,景深边缘采用小模板,非景深边缘采用大模板。修复透射率时为了保持边缘信息采用引导滤波对粗略透射率进行修复。本文算法可以有效的减少 Halo 效应,并能够很好地保持图像的边缘,并从主观和客观两方面对去雾图像进行评价。

## 2 暗原色先验的去雾算法

He 等人通过对大量晴朗天气下拍摄的无雾图像的特征进行观察,发现了在无雾晴朗的天气下拍摄的图像的非天空区域里,若把图像分为多个子块,每个子块中都会有某些像素点的一个颜色通道的亮度接近于 0,而雾天拍摄的图像没有这一特征,这一规律被命名为暗原色先验规律。基于暗原色先验规律方法的去雾算法,通过暗图像求粗略透射率,然后对粗略透射率进行修复。在修复透射率时,He 等人先是采用 Soft matting<sup>[8]</sup>对粗略透射率进行修复来达到抑制 Halo 效应现象的效果。但是 Soft matting 算法复杂,不具有实时性。后来 He 等人又提出了引导滤波器 Guide,对粗略透射率进行修复。Guide 和 Soft-matting 相比较,前者时间只是后者的 1/10。

### 2.1 雾天图像成像模型

大气散射模型被广泛应用于计算机视觉领域中,它的模型描述为:

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

$I(X)$ 为拍摄到的有雾图像, $t(x)$ 为透射率,它的取值范围  $0 \leq t(x) \leq 1$ , $A$  为大气光值, $J(x)$ 为需要复原的无雾图像。

### 2.2 暗原色先验

大部分的户外无雾图像的每个局部区域(不包括天空的绝大部分区域)都会存在某些至少在一个颜色通道的强度值非常低的像素点,这样的像素点被称暗像素点。

在户外拍摄的无雾图像中,限定的局部区域内至少存在一个颜色通道的强度值很低,假设这个限定区域为

$\Omega(x)$ ,则无雾图像  $J(x)$ 的暗原色可以表示为:

$$J^{dark}(x) = \min_{y \in \Omega(x)} \left\{ \min_{c \in \{r, g, b\}} [J^c(y)] \right\} \approx 0 \quad (2)$$

$$I^{dark}(x) = \min_{y \in \Omega(x)} \left\{ \min_{c \in \{r, g, b\}} [I^c(y)] \right\} \quad (3)$$

对大气散射模型式(1)两边进行局部区域大小为  $\Omega(x)$  的最小值滤波, $c \in \{r, g, b\}$ ,则得到:

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

由式(2)和式(4)可以得到透射率的粗略估计  $\tilde{t}$ :

$$\tilde{t} = 1 - \min_{y \in \Omega(x)} \left\{ \min_{c \in \{r, g, b\}} \left[ \frac{I^c(y)}{A^c} \right] \right\} \quad (5)$$

现实生活中,即使是晴天白云,也会存在一些颗粒,故应保留一定程度的雾<sup>[9]</sup>,为了增加复原图像的真实性引入调整因子  $w(0 < w \leq 1)$ ,则粗略估计透射率:

$$\tilde{t} = 1 - w \min_{y \in \Omega(x)} \left\{ \min_{c \in \{r, g, b\}} \left[ \frac{I^c(y)}{A^c} \right] \right\} \quad (6)$$

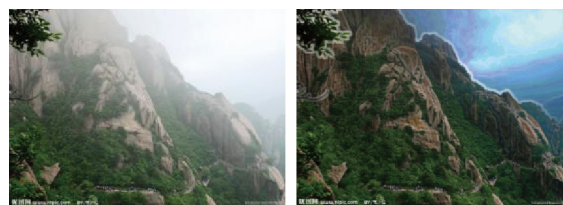
大气光值  $A$  假设已经知道,为了避免粗略估计的透射率的值接近 0,引入参考量  $t_0, t_0$  通常取值为  $0.1$ <sup>[10]</sup>。由式(1)和式(6)可以得到复原后无雾的图像:

$$J(x) = \frac{I(x) - A}{\max(\tilde{t}(x), t_0)} + A \quad (7)$$

## 3 景深边缘优化暗原色去雾

### 3.1 Halo 效应现象

图像去雾时,由于不知道景深的确切信息,在物体景深突变的边缘处会出现 Halo 效应现象,即产生的白色光晕<sup>[11]</sup>。有 Halo 效应的图像的边缘细节反而比没有 Halo 效应的图像边缘细节多。从人类的视觉感受出发,有 Halo 效应的图像会使图像视觉效果变差。如图 1(b)所示,在树叶的位置和山顶与天空的交界处都出现了光晕现象,影响去雾图像的质量。



(a) 有雾图像 (b) 去雾图像

图 1 去雾图像产生 Halo 效应

### 3.2 景深边缘优化透射率的求解

用于求暗图像的最小值滤波窗口,在整幅图像中采用同样大小的窗口,这表明图像中多数像素点的透射率是用它的临近区域像素点的透射率作为估计值,而非其本身的透射率值。由此推断,在整幅图像中场景点透射估计暗含了一个这样的假设,即认为在图像局部区域内,它们的透射率值相等或相近。这个假设在场景点的景深相等或相似是

合理的,因为透射率和场景景深相关,这正好符合图像局部区域内场景景深变化缓慢的这一事实。如果在最小值滤波的窗口内场景景深发生变化,上述结论就不成立,求暗图像采用的最小值滤波就会使景深边缘变化处的暗图像被低估<sup>[12]</sup>,景深边缘一侧的透射率  $t(x)$  被过高估计,导致 Halo 效应现象的产生,影响去雾图像的质量。

He 等人的去雾算法是采用窗口大小为  $15 \times 15$  的最小值滤波求暗图像,导致景深边缘的透射率被错误估计,进而导致在景深边缘处产生光晕。

实验发现:最小值滤波窗口  $\Omega$  越大,  $J^{dark} \rightarrow 0$  的程度越大,去雾程度也越大,但是会在景深突变处产生 Halo 效应现象;最小值滤波窗口  $\Omega$  越小,虽然 Halo 效应现象减弱,但

$J^{dark} \rightarrow 0$  的程度也越小,去雾程度减弱。

针对这一现象和 He 方法存在的缺陷,在求暗图像时,采用文献<sup>[13]</sup>提供的一种确定景深边缘的方法。本文在景深变处采用小模板,即接近图像大小 0.001 5% 的整数,得到的暗图像  $I_1^{dark}$ ,如图 2 所示。非景深突变处采用大模板,即接近图像大小 0.007 5% 的整数,得到的暗图像  $I_2^{dark}$ 。整幅图像的暗图像为两者之和,即:

$$I_{dark} = I_1^{dark} + I_2^{dark} \quad (8)$$

暗图像的变化,导致透射率发生变化,则景深边缘的粗略透射率记为  $\tilde{t}_1(x)$ ,非景深边缘的粗略透射率记为  $\tilde{t}_2(x)$ ,则整幅图像的粗略透射率

$$\tilde{t}(x) = \tilde{t}_1(x) + \tilde{t}_2(x) \quad (9)$$

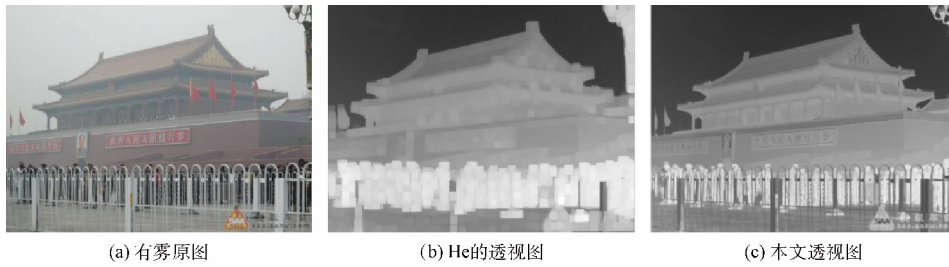


图 2 透视图

### 3.3 引导滤波修复透射率

在求解暗图像和估计粗略透射率时,采用的最小值滤波使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图像时使用的模板大小相关<sup>[14]</sup>,而且会出现块效应<sup>[15]</sup>。抠图软件 Soft matting 算法复杂,不具备实时性。因此本文采用引导滤波对粗略透射率进行修复,从而细化透射率。

本文采用有雾图像的灰度图像作为引导图像  $I$ ,滤波输入图像为上述过程求得的粗略透射率  $\tilde{t}$ ,像素点  $i$  处的滤波结果被表达成一个加全平均,详细过程见文献<sup>[16]</sup>,则修复后的透射率:

$$t_i = \sum_j W_{ij} (I) \tilde{t}_j \quad (10)$$

$$t = a_k I_i + b_k, \forall i \in w_k \quad (11)$$

### 3.4 图像复原

式(1)中的拍摄的有雾图像  $I(x)$  已知,透射率  $t(x)$  上述过程已经求得,大气光值  $A$  采用暗原色图像的像素值的前 0.1% 对应有雾图像的像素点像素值的均值。则复原后无雾的图像:

$$J(x) = \frac{I(x) - A}{\max[t(x), t_0]} + A \quad (12)$$

## 4 实验结果与分析

在本文算法的实验中,图 3 和图 4 中的(b)最小值滤波

窗口大小  $15 \times 15$ , (c)最小值滤波窗口大小  $3 \times 3$ ,图(d)在景深边缘和非景深边缘的最小值滤波窗口由本文提出的算法求得。在一台处理器为 3.30 GHz 的 Intel(R) Core (TM) i3-3220 CPU 的 PC 上的 MATLAB 进行处理图像。

人类视觉系统具有频率敏感度、掩蔽效应、方向敏感度、注意转移等特点。为了使评价结果与人的主观感知相一致,对图像进行评价时必须考虑人类视觉特性。李俊峰等人<sup>[17]</sup>所以用主观和客观结合的方法对去雾图像进行评价。

通过实验发现,图 3 和图 4 给出了本文的景深边缘检测去雾图像与 He 等人的去雾图像,从主观上可以看出本文算法不仅能够很好的去除雾对图像的干扰,而且降低了 Halo 效应对图像的影响。(b)图和(c)图与(d)图相比较可以发现,本文算法由于在景深边缘和非景深边缘采用不同的模板,使去雾图像比 He 算法的去雾图像更具有层次感。

目前比较常用的客观评价体系是 Hautiere 等人提出的可见边梯度法<sup>[18]</sup>。复原后图像的新增可见边之比  $e$ ,其中  $n_r$  和  $n_0$  分别表示原有雾图像  $I$  和复原之后的图像  $J$  中可见边的数目。可见边的梯度化均值  $r$ ,

$$e = (n_r - n_0) / n_0 \quad (13)$$

$$r = \exp\left[\frac{1}{n_r} \sum_{p_i \in r} \log r_i\right] \quad (14)$$

表 1 和表 2 中可以看出:与 He 等人采用  $15 \times 15$  的最小值滤波窗口和  $3 \times 3$  的最小值滤波窗口相比,本文算法



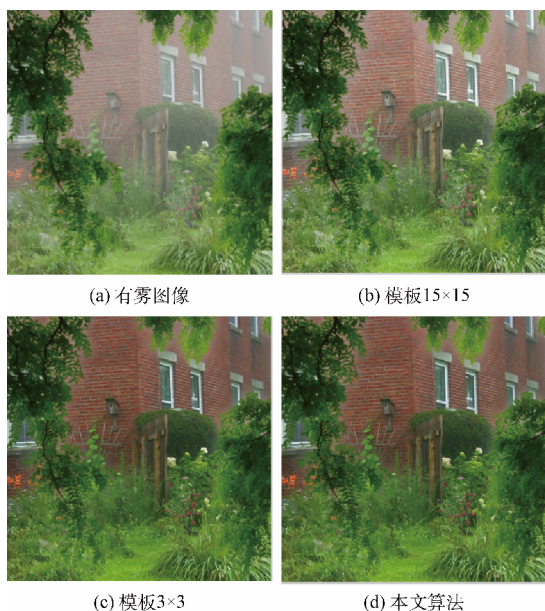


图 3 house 图像去雾结果对比



图 4 city 图像去雾结果对比

降低 Halo 效应的同时,新增可见边之比和可见边的梯度化均值得到最优解。

表 1 house 去雾图像质量客观评价

最小值滤波窗口	$e$	$r$
$3 \times 3$	0.105 26	1.121 6
本文算法	0.105 85	1.123 4

表 2 city 去雾图像质量客观评价

最小值滤波窗口	$e$	$r$
$3 \times 3$	0.495 41	1.347 4
$15 \times 15$	0.485 94	1.466
本文算法	0.503 25	1.452 2

## 5 结 论

根据暗原色先验模型的去雾方法,针对去雾图像易出现 Halo 效应现象,提出景深边缘和非景深边缘采用不同的模板进行最小值滤波的景深优化去雾算法,用引导滤波对粗略透射率进行修复。采用主观评价和客观评价结合的评价方法对去雾图像质量进行评价。实验发现,本文算法和 He 算法相比较不仅能很好地去除雾对图像质量的影响,而且降低了去雾图像产生的 Halo 效应现象。

## 参考文献

- [1] 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.
- [2] FATTAL R. Single image dehazing [J]. ACM Transactions on Graphics, 2008, 27(3): 1-9.
- [3] TAN R. Visibility in bad weather from a single image[C]. Proceedings of IEEE Conference Computer Vision and Pattern Recognition, Anchorage, Alaska, USA; IEEE, 2008: 1-8.
- [4] 叶崧, 杨万扣. 改进的基于大气光幕单幅图像去雾算法[J]. 电子测量技术, 2016, 39(3): 50-55.
- [5] 张冰冰, 戴声奎, 孙万源. 基于暗原色先验模型的快速去雾算法[J]. 中国图象图形学报, 2013, 18(2): 184-188.
- [6] 刘红平, 陈明义. 基于二次滤波的单幅图像快速去雾算法研究[J]. 计算机工程与应用, 2015, 51(8): 156-159.
- [7] 邓莉. 针对明亮区域的自适应全局暗原色先验去雾[J]. 光学精密工程, 2016, 24(4): 892-901.
- [8] HE K M, SUN J, TANG X. Single image Haze removal using dark channel prior[C]. Proceedings of IEEE Conference Computer Vision and Pattern Recognition. Tokyo, Japan; IEEE, 2009: 1956-1963.

(下转第 68 页)

- 巡视仿真培训系统设计与实现[J]. 电子测量技术, 2015, 38(04): 92-97.
- [8] 贺凯, 于鹏, 赵亮, 等. 电触觉皮肤机理仿真与刺激模式量化评估[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(4): 920-930.
- [9] 刘少华, 孟国营. 基于 Quest3D 的煤矿主扇风机虚拟现实的研究[J]. 同煤科技, 2012, 133(3): 1-3, 44.
- [10] 白鹤原, 查小菲. 基于 OSG 的煤矿培训系统的设计[J]. 中国科技博览, 2011(3): 62-63.
- [11] 黄俊铭, 艾伯特电通. Quest3D 黑皮书从入门到精通[M]. 台湾: 上奇咨询股份有限公司, 2010: 1104-1105.
- [12] 金鑫. 燃气锅炉控制系统的设计与实现[D]. 长沙: 湖南大学, 2014: 8-10.
- [13] 邬斌扬, 黄海波, 施崇槐. 燃气发动机的空燃比控制关键技术研究[J]. 西华大学学报: 自然科学版. 2011(2): 8-11.
- [14] 刘海洋, 王大虎, 王敬冲. 基于 Quest3D 的采煤机虚拟培训系统设计[J]. 工矿自动化, 2015, 41(4): 102-105.
- [15] 王大虎, 史艳楠, 陈文博. 基于 Quest3D 的煤矿副井提升机虚拟实操系统的开发[J]. 制造业自动化, 2014(17): 114-117.
- [16] 吴益宇, 李佳亮, 张迎辉, 等. 西门子的 PLC 远程在线访问实验室[J]. 可编程控制器与工厂自动化, 2011(3): 61-64.
- ### 作者简介
- 王大虎, 1969 年出生, 博士, 副教授, 研究方向为虚拟现实技术、测量仪器与仪表、过程控制。
- 陈侠, 1990 年出生, 硕士研究生, 研究方向为虚拟现实技术与 PLC。
- E-mail: 1181318395@qq.com
- 高会争, 1992 年出生, 硕士研究生, 研究方向为工业过程控制。
- 
- (上接第 58 页)
- [9] 石林玉, 谢维成, 蒋文波, 等. 变压器套管油位雾霾图像检测方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2016, 30(6): 854-861.
- [10] 郭璠, 蔡自兴, 谢斌等. 图像去雾技术研究综述与展望[J]. 计算机应用, 2010, 30(9): 2417-2421.
- [11] 陈露, 和红杰, 陈帆. 基于边界邻域最大值滤波的快速图像去雾算法[J]. 光子学报, 2014, 43(11): 114-119.
- [12] 陈露. 基于滤波的暗原色先验图像去雾算法[D]. 成都: 西南交通大学, 2015.
- [13] 陈丽, 郭玉坤, 李金屏. 一种基于 Sigmoid 函数的抑制 Halo 效应的有效算法[J]. 计算机科学, 2015, 42(11): 112-117.
- [14] 王卫星, 肖翔, 陈良琴. 结合最小滤波和引导滤波的暗原色去雾[J]. 光学精密工程, 2015, 23(7): 2100-2108.
- [15] 章郡锋, 吴晓红, 黄晓强, 等. 基于暗原色先验去雾的改进算法[J]. 电视技术, 2013, 37(23): 192-195.
- [16] HE K M, SUN J, TANG X. Guided image filtering[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2013, 35(6): 1397-1409.
- [17] 李俊峰, 方建良, 戴文战. 基于色彩感知的无参考图像质量评价[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(2): 339-350.
- [18] HAUTUERE N, TAREL J P, AUBERT D, et al. Blind contrast enhancement assessment by gradient rationing at visible edges[J]. Image Analysis and Stereology Journal, 2008, 27(2): 87-95.
- ### 作者简介
- 李可, 硕士, 研究方向为图像处理。
- E-mail: 1606429843@qq.com
- 刘辉, 硕士, 副教授, 研究方向为语音去噪处理、图像处理 and 信号处理算法。
- E-mail: liuhui1366@126.com
- 汪丹, 硕士, 研究方向为图像处理。
- E-mail: 1603926823@qq.com
- 周威, 硕士, 研究方向为图像处理。
- E-mail: 454923283@qq.com