

# 基于保留边缘的 $\tilde{\Delta}$ -Trous 小波修正单一图像去雾

高凯\*, 朴燕

长春理工大学电子信息工程学院, 吉林 长春 130022

**摘要** 为解决有雾场景图像复原过程中目标边缘存在细节模糊及丢失的问题, 结合暗原色先验理论、引导图像滤波和保留边缘的  $\tilde{\Delta}$ -Trous 小波滤波方法, 提出一种保留边缘的  $\tilde{\Delta}$ -Trous 小波修正的单一图像去雾算法。先对暗原色先验的引导图像滤波去雾算法进行复现, 再引入保留边缘的  $\tilde{\Delta}$ -Trous 小波滤波算子, 用三级小波滤波后的残差结果补偿暗原色先验的引导图像滤波去雾的结果。实验结果表明, 相较于暗原色先验的引导图像滤波去雾算法, 采用可见边对比度作为客观衡量标准, 新增的可见边之比至少提高 69.5%, 可见边的规范化梯度均值提高 30%, 饱和黑色或白色像素点的百分比降低一半以上。通过主观辨识, 去雾算法生成的结果中保留了图像的边界和纹理细节信息, 恢复出来的图像颜色更贴近实际生活, 去雾效果有较大改善, 纹理边缘更加细腻。

**关键词** 图像处理; 去雾; 暗原色先验理论; 导向滤波; 保留边缘的  $\tilde{\Delta}$ -Trous 小波滤波

中图分类号 TP391.41 文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.081007

## Modified Single Image Dehaze Based on Edge Preserving $\tilde{\Delta}$ -Trous Wavelet

Gao Kai\*, Piao Yan

College of Electronic and Information Engineering, Changchun University of Science and Technology,  
Changchun, Jilin 130022, China

**Abstract** In order to solve the problem of blurred and lost target edges in the recovery process of fog scene images, we propose a single image dehaze method based on  $\tilde{\Delta}$ -Trous wavelet, which is combined with the dark channel prior theory, guided filter, and edge preserving  $\tilde{\Delta}$ -Trous wavelet filtering method. The dehaze algorithm of guiding filtering on dark channel prior is reproduced. Then, we introduce edge preserving  $\tilde{\Delta}$ -Trous wavelet filter into the dehaze algorithm, and adopt the three level wavelet filtered residuals to compensate for the guide image filtering algorithm with the dark channel prior. Experimental results show that, compared with the guided image filtering haze removal algorithm based on dark channel prior, the rate of new visible edges is increased by 69.5% at least, the normalized gradient mean of the visible edge is increased by 30%, and the percentage of the saturated black or white pixels is reduced by a half at least, when visible edge contrast is used as an objective criterion. The proposed method can retain the edge and texture details of image while removing haze, and the restored image color is closer to the real life. The effect of dehaze is improved, and the edge of the texture is more delicate.

**Key words** image processing; dehaze; dark channel prior theory; guided filter; edge preserving  $\tilde{\Delta}$ -Trous wavelet filter

**OCIS codes** 100.3020; 100.2000; 100.3008

## 1 引言

大气中的浑浊介质, 如分子、水滴、尘埃等, 经大气吸收或者散射形成了雾、蒸气、雾霾等自然现象。当在这样的户外取景时, 景物通过反射自然光进入照相机, 但上述原因会导致图像模糊, 降低图像<sup>[1-4]</sup>,

直接导致图像对比度和颜色保真度下降。在消费、安防、摄影、遥感等领域, 图像去雾技术具有更加广泛的需求<sup>[2,5-9]</sup>。在图像去雾过程中, 由于雾的浓厚程度未知、雾掩盖下真实场景的深度未知, 以及取景时光照角度等因素的影响, 去雾成为一个具有开放性和挑战性的不确定问题。

收稿日期: 2018-01-17; 修回日期: 2018-02-09; 录用日期: 2018-03-16

基金项目: 科技部项目(2015DFR10670)、2015 年教育厅“十二五”科技规划项目(吉教合字[2015]第 63 号)

\* E-mail: kai\_gao@126.com

现有的去雾算法中较有影响力的是 Fattal<sup>[1]</sup>提出的算法,为了消除散射光,增加场景可见性和恢复无雾场景,Fattal 提出了在阴影和传输函数局部统计不相关的条件下寻找解决数据的奇异问题。除了传输函数外,他还改进了描述表面阴影的图像去雾模型。He 等<sup>[2]</sup>在此基础上提出暗原色先验去雾模型,通过对自然图像进行分析,总结出暗原色先验规律,并建立去雾模型,得到较好的去雾图像;随后,又提出了导向滤波算法,并将导向滤波算法与去雾模型相结合,致力于提高去雾算法的质量。文献[3,4,6,8]围绕 He 等<sup>[2]</sup>提出的算法进行改进,均取得了较好的去雾效果。基于文献<sup>[2]</sup>算法的去雾图像的边缘及细节部分存在模糊现象,对此,本文提出一种基于保留边缘的 A-Trous 小波修正的单一图像去雾算法,在提高去雾质量的同时,恢复图像中边缘及纹理的细节信息。由于尚未建立起关于去雾图像评价的统一体系<sup>[10-11]</sup>,本文选用较为常用的可见边对比度<sup>[11]</sup>作为评价标准,并给出结论。

## 2 去雾模型

目前应用广泛的去雾模型<sup>[1-6,8]</sup>为

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

式中  $I$  是观测到图像的亮度,  $J$  是场景光线强度,  $A$  代表全球大气光成分,  $t$  代表光线经介质反射到照相机中、且没有散射现象的部分。去雾的宗旨就是在图像亮度  $I$  已知的情况下, 复原出  $J$ 、 $A$  和  $t$  的过程。相对于无雾图像, 含雾图像是一种退化图像, 雾在图像中表示为一种噪声, 因此图像去雾的实质也是一种由结果反推原始无雾图像的过程。将(1)式中右侧第一项  $J(x)t(x)$  称为直接衰减项, 第二项  $A[1-t(x)]$  称为大气光成分。直接衰减项指景物光线经透射媒介衰减后剩余的部分, 而大气光成分受前方散射影响, 可以造成场景颜色的偏移。若将大气层看成是各项同性的, 则透射率为

$$t(x) = \exp[-\beta d(x)], \quad (2)$$

式中  $\beta$  代表大气散射系数,  $d$  代表场景深度。则景物实际光线可以理解为随景深  $d$  按指示衰减的规律。

根据局部表面投影  $J(x)$  和透射率函数  $t(x)$  在统计学上是独立的假设, Fattal<sup>[1]</sup>提出了基于独立成分分析的实现方法来估算表示图像局部区域反射率的恒定向量  $\mathbf{R}$ 。考虑到局部区域的假设问题具有局限性, He 等<sup>[2]</sup>在分析暗原色先验的基础上, 提出了较优秀的去雾算法, 通过将众多无雾图像进行统计

分析可知, 以 RGB 格式存储的图像在 3 个通道中会有像素值很低的点, 通过这一规律假设, 判定达到数的暗原色都具有比较低的平均强度值。鉴于这一规律, 将暗原色先验的概念应用到去雾模型中。在透射率估计过程中, 假设大气光已知, 将(1)式变形为

$$\frac{I^c(x)}{A^c} = t(x) \frac{J^c(x)}{A^c} + 1 - t(x), \quad (3)$$

式中  $c$  为 RGB 三彩色分量通道。定义透射率为  $\tilde{t}(x)$ , 根据暗原色估计,  $J$  接近于零, 考虑到保留深度感, 可以估计出透射率的表达式为

$$\tilde{t}(x) = 1 - \omega \cdot \min_{y \in \Omega(x)} \left[ \min_c \frac{I^c(y)}{A^c} \right]. \quad (4)$$

## 3 导向滤波

假设引导图像  $I$  是局部线性, 对以  $I$  中像素  $k$  为中心、 $w_k$  为窗的线性变换记为  $q$ , 则:

$$q = a_k I + b_k, \forall i \in w_k, \quad (5)$$

式中  $(a_k, b_k)$  是  $w_k$  窗中的一系列线性系数。通过使用边长为  $2r+1$  的方形窗, 局部线性模型保证当  $I$  存在边缘时,  $q$  也是边缘。为了求解线性系数, 须找到使滤波输入  $p$  与  $q$  相差最小时的解, 特别强调的是, 求基于窗的代价最小的解:

$$E(a_k, b_k) = \sum_{i \in w_k} [(a_k I_i + b_k - p_i)^2 + \epsilon a_k^2], \quad (6)$$

$$a_k = \frac{\frac{1}{|w|} \sum_{i \in w_k} I_i p_i - \mu_k \bar{p}_k}{\sigma_k^2 + \epsilon}, \quad (7)$$

$$b_k = \bar{p}_k - a_k \mu_k, \quad (8)$$

式中  $\epsilon$  是防止  $a_k$  太大的正则化参数,  $\mu_k$  和  $\delta_k^2$  是  $I$  中窗  $w_k$  中的平均值和方差,  $|w|$  代表的是窗  $w_k$  中的像素个数,  $\bar{p}_k = \frac{1}{|w|} \sum_{i \in w_k} p_i$  是  $w_k$  窗中  $p$  的平均值。应用局部窗在整个图像中进行遍历计算, 得出的滤波输出为

$$q_i = \frac{1}{|w|} \sum_{k \in w_i} (a_k I_i + b_k) = \bar{a}_i I_i + \bar{b}_i, \quad (9)$$

$$\text{式中 } \bar{a}_i = \frac{1}{|w|} \sum_{k \in w_i} a_k, \bar{b}_i = \frac{1}{|w|} \sum_{k \in w_i} b_k.$$

## 4 边缘保留的 A-Trous 小波修正的单一图像去雾

Holschneider 等<sup>[7]</sup>提出了 A-Trous 滤波算法, A-Trous 滤波算法结合了离散小波变换与高斯滤波的优点。Fattal<sup>[12]</sup>对 A-Trous 滤波器进行扩展, 将双边滤波中的边缘保留函数增加到 A-Trous 滤波

器中,发展成为保留边缘的 A-Trous 小波滤波器。A-Trous 滤波器通过有限滤波器内插近似,实现了无抽取的离散小波变换,使得分解后的信号具有与输入信号相同的尺寸。又由于边缘保留的 A-Trous 小波滤波器中引入了含有基于空间分布的高斯滤波边缘保留函数,所以在图像边缘附近,离边缘较远的像素几乎不会影响到边缘上的像素值,这样就保证了图像边缘附近像素值不受影响。

为了解决由导向滤波在去雾质量上所引起的目标边缘模糊的情况,本文提出将保留边缘的 A-Trous 小波<sup>[7,12]</sup>与导向滤波<sup>[5]</sup>相结合的算法,旨在改善去雾后图像的边缘细节复原质量。用 A-Trous 小波对导向滤波结果进一步滤波,提取各级小波系数,用小波系数修正导向滤波结果。也就是说,用提取的高频分量补偿导向滤波结果,从而保留更多的边界及纹理细节信息。具体算法如下。

1) 设  $q$  为导向滤波输出图像,则起始小波滤波信号为  $c_0(q)$ ,小波级  $i=0$ 。

$$c_{i+1}(q) = \frac{1}{k} \sum_{q' \in \Omega} h_i(q') \cdot w(q, q') \cdot c_i(q), \quad (10)$$

式中  $q$  和  $q'$  代表像素位置,  $\Omega$  代表  $h_i$  中非零系数的像素位置范围,  $k$  是归一化因子,  $w(q, q')$  是边缘保留函数。

$$k = \sum_{q' \in \Omega} h_i(q') \cdot w(q, q'), \quad (11)$$

$$w(q, q') = w_d(q, q') \cdot w_x(q, q'), \quad (12)$$

式中  $w_d(q, q')$  和  $w_x(q, q')$  分别是输入像素灰度像素值  $d$  和像素位置  $x$  的权重函数,

$$w_d(q, q') = \exp\left(\frac{\|A_q - A_{q'}\|}{\sigma_d^2}\right), \quad (13)$$

$$w_x(q, q') = \exp\left(\frac{\|x_q - x_{q'}\|}{\sigma_x^2}\right), \quad (14)$$

式中  $A_q$  和  $A_{q'}$  分别是像素  $q$  和  $q'$  的灰度像素值,  $x_q$  和  $x_{q'}$  分别是图像平面中像素  $q$  和  $q'$  的位置坐标,  $\sigma_d$  和  $\sigma_x$  是标准差。

3) 求取由 A-Trous 小波变换之后的第  $i$  级小波系数,其实质是滤波前后的图像差值,反映了图像的部分高频信息。

$$d_i(q) = c_{i+1}(q) - c_i(q), \quad (15)$$

式中  $d_i$  是第  $i$  级小波系数。

4) 将第  $i$  级小波系数用于补偿引导图像滤波结果,作为算法的最终输出结果,即

$$X_{out} = \omega_1 \cdot q + \omega_2 \cdot d_i(q), \quad (16)$$

式中  $q$  为导向滤波输出图像,  $d_i(q)$  为第  $i$  级小波系

数,  $\omega_1, \omega_2$  为加权系数。

## 5 实验结果及分析

根据以上分析,取  $\omega_1 = \omega_2 = 0.5, \sigma_d = 0.1, \sigma_x = 1.0$ <sup>[13]</sup>, 小波变换级数  $i = 3$ 。为了客观比较相关结果,选用天安门外景、中央电视台外景及山脉三组图片进行去雾处理。其中图 1(a)为有雾图像,图 1(b)为采用文献[5]导向滤波方法进行去雾的结果,图 1(c)为采用文献[4]方法进行去雾的结果,图 1(d)为采用文献[12]方法进行去雾的结果,图 1(e)为本文方法的去雾结果(小波变换级数  $i = 3$ )。

客观分析。根据 Hautière 等<sup>[11]</sup>提出的 3 个评价参量来衡量去雾前后图像可见边对比度的变化,分别为新增的可见边之比  $e$ 、可见边的规范化梯度均值  $r$  及饱和黑色或白色像素点的百分比  $\sigma$ 。根据此衡量标准,  $e$  和  $r$  越大、 $\sigma$  越小时, 对应算法的去雾效果越好。本文算法的  $e$  和  $r$  都高于文献[5]去雾算法,而  $\sigma$  低于文献[5]去雾算法,这说明本文算法的去雾效果与之相比有很大的改善。对比本文方法与文献[4]、[12]的数据结果(表 1~3),各方法在 3 项指标上互有优势,从表中数据并不能比较出各算法的优劣。

表 1 天安门外景图像可见边对比度比较结果

Table 1 Comparison results of visible edge contrast in Tiananmen's exterior image

Algorithm	$e$	$r$	$\sigma / \%$
Method in Ref. [5]	0.1267	0.93814	0.8100
Method in Ref. [4]	0.2143	1.9076	0.0044
Method in Ref. [12]	0.1697	1.8599	0.1174
Proposed method	0.4480	1.5793	0.3018

表 2 中央电视台外景图像可见边对比度比较结果

Table 2 Comparison results of visible edge contrast in CCTV's exterior image

Algorithm	$e$	$r$	$\sigma / \%$
Method in Ref. [5]	0.64611	1.4018	17.415
Method in Ref. [4]	0.85403	2.6742	6.5471
Method in Ref. [12]	0.905	2.7623	10.9102
Proposed method	1.4749	1.8261	3.5947

表 3 山脉可见边对比度比较结果

Table 3 Comparison results of visible edge contrast in mountain

Algorithm	$e$	$r$	$\sigma / \%$
Method in Ref. [5]	0.6800	0.6879	5.4496
Method in Ref. [4]	0.9448	1.8889	0.1122
Method in Ref. [12]	0.9644	1.9179	3.2937
Proposed method	1.1526	1.1181	2.1100

主观分析。相比于文献[5]、文献[4]、文献[12]去雾方法的结果,本文算法结果有如下明显优势:图1中第一行,本文方法的去雾结果中建筑外墙颜色的真实性更高,并且在近景花坛处树墙的色彩更真实;图1中第二行,本文方法去雾结果中的楼体建筑以及道路场景更加清晰;图1中第三行,本文方法去

雾结果中的近景石头边缘及细节效果更好。本文算法之所以能有效提高图像的去雾效果,主要是因为采用保留边缘的 $\text{A-Trous}$ 小波在3级小波处理后,能有效滤掉图像的高频部分,并将残差图像与原图像进行加权叠加,以恢复最终结果的高频信息,更好地体现图像的真实性。

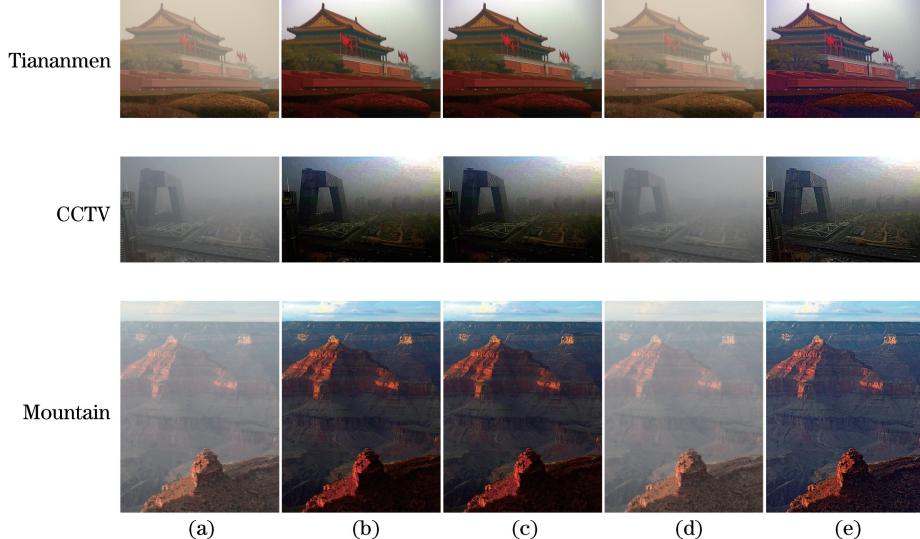


图1 不同图像的去雾结果。(a)有雾图像;(b)文献[5]方法;(c)文献[4]方法;(d)文献[12]方法;(e)本文方法

Fig. 1 Dehaze results of different images. (a) Hazy image; (b) method in Ref. [5]; (c) method in Ref. [4]; (d) method in Ref. [12]; (e) proposed method

## 6 结 论

针对由雾霾导致的图像降质情况,在分析经典的去雾模型和基于暗原色与导向滤波的去雾算法之后,引入基于边缘保留的 $\text{A-Trous}$ 小波,提出基于边缘保留的 $\text{A-Trous}$ 小波修正的单一图像去雾算法,旨在改善去雾后图像的边缘及纹理细节的清晰度。实验结果显示,修正后的图像在目标边缘、纹理以及清晰度方面有较大提升。采用可见边对比度衡量去雾结果,从客观指标上看,本文方法明显优于文献[5]去雾结果。去雾问题本身是一个不确定问题,因此优良的去雾算法需要考虑在去雾的同时,尽可能多地保留目标场景的细节信息。今后将继续致力于改善去雾质量、提高目标的可辨识度。

## 参 考 文 献

- [1] Fattal R. Single image dehazing [J]. ACM Transactions on Graphics, 2008, 27(3): 72.
- [2] 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.
- [3] Lin Z, Wang X. Dehazing for image and video using guided filter [J]. Open Journal of Applied Sciences, 2012, 2(4): 123-127.
- [4] Zeng J X, Yu Y L. Image defogging and edge preserving algorithm based on dark channel prior and bilateral filtering [J]. Journal of Image and Graphics, 2017, 22(2): 147-153.
- 曾接贤,余永龙.双边滤波与暗通道结合的图像保边去雾算法[J].中国图象图形学报,2017,22(2):147-153.
- [5] He K, Sun J, Tang X. Guided image filtering [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2013, 35(6): 1397-1409.
- [6] Xiao J S, Gao W, Zou B Y, et al. Image dehazing based on sky-constrained dark channel prior [J]. Acta Electronica Sinica, 2017, 45(2): 346-352.
- 肖进胜,高威,邹白昱,等.基于天空约束暗通道先验的图像去雾[J].电子学报,2017,45(2):346-352.
- [7] Holschneider M, Kronland M R, Morlet J, et al. A real-time algorithm for signal analysis with the help of the wavelet transform [M]. Berlin: Springer Verlag, 1989: 280-298.

- [8] Dai S B, Xu W, Piao Y J, *et al*. Remote sensing image defogging based on dark channel prior [J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(3): 0328002.  
代书博, 徐伟, 朴永杰, 等. 基于暗原色先验的遥感图像去雾方法 [J]. 光学学报, 2017, 37 (3): 0328002.
- [9] Yang A P, Bai H H. Nighttime image defogging based on the theory of Retinex and dark channel prior [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54: 041002.  
杨爱萍, 白煌煌. 基于 Retinex 理论和暗通道先验的夜间图像去雾算法 [J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(4): 041002.
- [10] Li J T, Zhang Y J. Improvements of image haze removal algorithm and its subjective and objective performance evaluation [J]. Optics and Precision Engineering, 2017, 25(3): 735-741.
- [11] Hautière N, Tarel J P, Aubert D, *et al*. Blind contrast enhancement assessment by gradient ratioing at visible edges [J]. Image Analysis & Stereology, 2011, 27(2): 87-95.
- [12] Fattal R. Edge-avoiding wavelets and their applications [J]. ACM Transactions on Graphics, 2009, 28(3): 22.
- [13] Gao K, Chen H X, Zhao Y, *et al*. Depth map filtering and upsampling method for virtual view rendering [J]. Journal of Image and Graphics, 2013, 18(9): 1085-1092.  
高凯, 陈贺新, 赵岩, 等. 面向虚拟视点绘制的深度图滤波及上采样方法 [J]. 中国图象图形学报, 2013, 18(9): 1085-1092.