

文章编号 1004-924X(2020)06-1387-08

改进暗通道先验的航空图像去雾

韩昊男^{1,2}, 钱 锋², 吕建威^{1,2}, 张 葆^{2*}

(1. 中国科学院大学, 北京 100049;

2. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘要:目前较为流行的去雾算法都存在着过度增强以及增强不足, 容易造成光晕效应以及色彩严重失真。提出一种基于四叉树细分的改进大气光估计方法以及一种改进的引导滤波用来解决这些问题。首先, 对非重叠暗通道使用四叉树细分方法估计更加可靠的大气光值。然后, 分析引导滤波在边缘区域的光晕效应产生的原因, 对其加入自适应权重因子, 用改进后的引导滤波对初始传输图进行优化。最后, 用估计的大气光值和优化后的传输图根据大气散射模型得到去雾图像。实验结果表明: 去雾后的图像颜色较为可靠, 边缘区域光晕效应减弱。从颜色可靠性和细节增强度来说, 提出的算法比现阶段的去雾算法有较为出众的表现。

关键词: 图像去雾; 暗通道先验; 引导滤波; 光晕效应; 颜色失真

中图分类号: TP394.1; TH691.9 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20202806.1387

Aerial image dehazing using improved dark channel prior

HAN Hao-nan^{1,2}, QIAN Feng², LÜ Jian-wei^{1,2}, ZHANG Bao^{2*}

(1. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;*

2. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China*)

* *Corresponding author, E-mail: zhangb@ciomp.ac.cn*

Abstract: Most existing dehazing algorithms suffer from under-or over-enhancement, color distortion, and halo artifacts. An improved method of atmospheric light estimation using quad-tree subdivision and an improved guided filter were proposed to solve these problems. First, a more faithful estimate of global atmospheric light was produced by quad-tree subdivision using a non-overlapped dark channel. Then, the reasons for the existence of halo artifacts in edge regions were discussed and an adaptive weight was added to the guided image filter. The improved guided image filter was used to refine the raw transmission map. Finally, based on the atmospheric scattering model, a dehazed image was obtained using the estimated atmospheric light value and refined transmission map. Experimental results indicate that the color of the dehazed image is more reliable and halo artifacts in edge regions are reduced. The proposed algorithm performs better than state-of-the-art haze removal algorithms in terms of color fidelity and detail enhancement.

Key words: image dehazing; Dark Channel Prior(DCP); guided image filter; halo artifacts; color distortion

1 引言

航空光电成像设备在外场工作时,不可避免地会受到天气的影响。在雾霾天气条件下,大气介质中悬浮着大量的水汽、尘埃等颗粒对大气中传播的光线进行散射和吸收,导致航空光电成像设备所采集图像质量下降。大气中浮质颗粒的降质机理主要包括:衰减和大气光。场景目标反射的光线在大气传播过程中将随着传播距离的增加而发生显著衰减;同时,大气中浮质颗粒的散射光线也将掺杂进物体的反射光线中,形成大气光。受这两种机理的影响,降质后的图像表现为:图像对比度降低,纹理模糊不清以及场景颜色的偏移。在雾霾天气条件下捕获的航空图像,图像质量较差,不利于人眼的观察,也会影响到航空光电成像系统后端的定位、跟踪、识别等各类智能化技术的正常运行^[1-3]。因此,研究图像去雾增强技术对提升图像质量,突破设备的使用天气条件限制及提高设备整体工作性能有着重要的研究意义和应用价值。

最近,单幅图像去雾方法取得了重大进展。颜色衰减先验(Color Attenuation Prior,CAP)^[4]凭经验的观察发现有雾图像的亮度和饱和度之差和雾的浓度有相关性,其用亮度和饱和度之差来估计雾的浓度,经过学习的方法得到有雾图像的深度图,并用其来去雾。非局部先验(Non-Local Prior,NLP)^[5-6]经过实验发现无雾图像的颜色可以在RGB空间中聚类,这些像素在雾的影响下会聚类成以大气光为原点的一条条雾霾线,在一条雾霾线中像素到大气光的距离和雾的浓度深深相关,用其进行去雾。He提出了一种基于暗通道先验(Dark Channel Prior,DCP)^[7]的去雾方法。首先粗估计出原始传输图,然后利用软抠图原理^[7]或者引导滤波^[8]对原始传输图进行优化,该算法是常用的普遍去雾算法,许多去雾算法都是基于该算法提出的^[9-16]。然而,这些方法存在一个共同的缺点,即去雾后图像容易产生光晕效应或者色彩严重失真现象。

本文依据暗通道先验原理,对大气光估计以及引导滤波进行了改进。通过对非重叠的暗通道使用四叉树细分的方法来求得更精确的大气光值,并对引导滤波提出一种自适应权重因子的方法对传输图进行优化以减弱光晕现象的问题。实

验结果,该方法既能实现良好的去雾效果,又能改善暗通道先验针对大面积白色物体的适用缺陷,从而扩大了暗通道先验实现图像去雾的范围,并且可以减弱光晕现象。

2 暗通道原理

2.1 大气散射模型

在计算机视觉中,广泛应用于有雾图像的大气散射模型^[17-19]为:

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

其中: x 是像素坐标, $I(x)$ 是观察到的有雾图像, $J(x)$ 是无雾图像, A 是全局大气光, $t(x)$ 是大气传输图。

2.2 暗通道先验

He等^[7]基于对大量无雾图像(不包括天空区域)统计观察发现,无雾图像中大多数的局部区域包含着一些强度值很低或者强度值接近于零的像素。基于此,他提出了暗通道先验模型,即对于任意一幅无雾图像,暗通道可以被计算为在一个局部区域全部像素的最小值:

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

其中: Ω 是以 x 为中心的一个方形窗口, J^c 是 J 的一个确定了的RGB颜色通道, J^{dark} 是暗通道图像。

暗通道和雾的浓度深深相关,He等挑选暗通道最亮的0.1%像素,这些像素就是雾最浓的像素,并从这些像素中挑选原图像 I 中强度最大的像素作为大气光的估计值。然而,受白色物体的影响,暗通道选择雾最浓的区域可能会失效。

He等假设在 $\Omega(x)$ 领域内传输值为常数,记为 $\tilde{t}(x)$,对式(1)变形并对两边求最小值,且已知大气光的估计值 A ,将式(2)代入可得:

$$\tilde{t}(x) = 1 - \min_{y \in \Omega(x)} \left(\min_{c \in \{r, g, b\}} \frac{I^c(y)}{A^c} \right). \quad (3)$$

若是将式(3)直接代入式(1)中,去雾图像会出现明显的块效应,因此He等采用软抠图^[7]对其进行优化,后来将软抠图换成引导滤波^[8]用来对原始传输图进行保边平滑。然而,当图像平滑和保边同时应用时,由于固定的正则化参数,边缘可能会无法避免地被平滑,会产生光晕效应。

本文中,针对上述两个问题,提出了一种改进的大气光估计方法,以解决大气光估计不准确的问题。

问题。并提出一种改进的引导滤波对传输图进行优化以解决光晕效应。利用优化后的传输图 $t(x)$, 去雾图像 $J(x)$ 可表示为:

$$J(x) = \frac{I(x) + A}{\max(t(x), t_0)} + A, \quad (4)$$

式中 t_0 是一个防止分母为 0 的一个下限值, 本文中取值为 0.1。

3 本文算法

3.1 大气光估计

He 等^[7]首先在暗通道中选取最亮的 0.1% 像素, 然后从其中选取强度最高值作为大气光估计值。然而, 受白色物体的影响, 暗通道可能会错误的选取雾最浓的区域, 从而导致错误的大气光估计值, 这样去雾图像可能会产生颜色扭曲现象。Kim 等^[20]对有雾图像进行四叉树细分, 并从分成的子块中选取最大平均值的子块, 再将该子块进行四叉树细分, 重复该过程直至达到预先设定好的次数为止。然后在最后的子块中, 选取一个和 (255, 255, 255) 最小的距离的颜色向量作为大气光的估计值。然而, 如果图像中包含明亮区域, 这个方法可能会错误的估计大气光值, 如图 1(b) 所

示。为了更加可靠的选取大气光值, 本文假定大气光弥漫在有雾图像的大部分区域, 而且在局部区域它的强度值是最高的。通过假定大气光的这两个方面, 本文通过对一个改进后的暗通道图像进行四叉树细分。该改进的暗通道与原始暗通道的区别在于该改进后的暗通道将图像分成各个不重叠的子块 $L(x)$, 对每个子块中选取这个子块中最小值代替这个子块中所有的值, 从而得到改进的暗通道:

$$J^{\text{dark}}(x) = \min_{c \in \{r, g, b\}} (\min_{y \in L(x)} (J^c(y))). \quad (5)$$

该子块大小根据准确性和可靠性两方面来凭经验的选取为 30×30 , 图 1(c) 展示了通过式 (5) 改进后的暗通道。从图中可以发现, 改进后的暗通道比原始图像子块平均值有着更低的强度值, 在该提出的方法中, 四叉树细分方法可以选取更加可靠的用来估计大气光的候选区域。可以从图 1(c) 看出, 提出的方法选取天空区域作为最终的候选区域, 该方法没有受到图像底部白色建筑物的干扰。在最终候选区域的像素中, 本文通过选取一个和 (255, 255, 255) 最小距离的颜色向量作为大气光的估计值, 即 $\| (r, g, b) - (255, 255, 255) \|$ 。通过最小化与纯白色 (255, 255, 255) 的距离, 可以估计更可靠的大气光估计值。

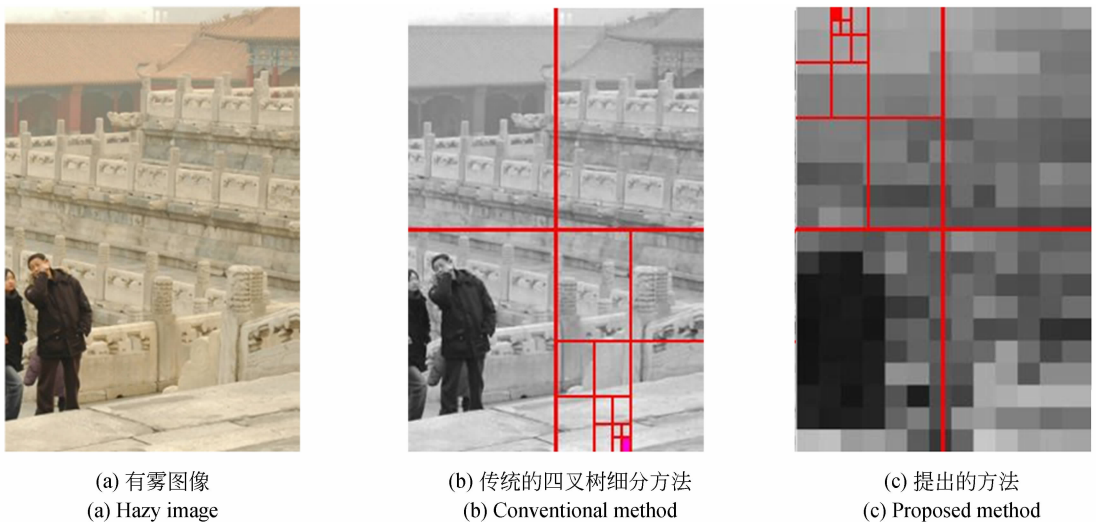


图 1 图像中填满红色区域为最终选定区域

Fig. 1 Blocks filled with red color are finally selected region

3.2 引导滤波的改进

引导滤波^[8]可以平滑图像和保持图像边缘信息, 其最大的特点是计算速度快, 近几年出现了一

些基于引导滤波的去雾算法^[21-22]。引导滤波的关键假设是局部线性模型:

$$q_i = a_k I_i + b_k, \quad \forall i \in \omega_k, \quad (6)$$

其中: I 是引导图像, q 是滤波输出, ω_k 是以像素 k 为中心 r 为半径的一个方形窗口, a_k 和 b_k 是两个在窗口 ω_k 下的线性系数, 假定为常数。

局部线性模型保证了只有当引导图像 I 有边缘时, 对应的输出图像 q 也会有该边缘。引导滤波是一个快速保边平滑滤波器。它对比双边滤波, 不仅其速度比双边滤波快, 而且引导滤波可以避免出现梯度反转效应。引导滤波的线性系数 a_k 和 b_k 可以通过最小化代价函数 $E(a_k, b_k)$ 来得到:

$$E(a_k, b_k) = \sum_{i \in \omega_k} ((a_k I_i + b_k - p_i)^2 + \lambda a_k^2), \quad (7)$$

其中正则化参数 λ 用来防止 a_k 过大。然而, 由于引导滤波的 λ 参数是固定的, 当引导滤波用于平滑图像时, 其也会同样地平滑边缘, 这样以来, 光晕效应就会无法避免的产生。为了减弱光晕效应, 本文引入了一个自适应权重 φ_i 来解决这个问题, 自适应权重因子可以根据不同的情况来调整正则化参数。理想的权重模型需要当像素在边缘时有个大的权重, 而在非边缘时有个小的权重。而图像的梯度信息可以满足这个思想。所以自适应权重因子 φ_i 被设计为:

$$\varphi_i = \epsilon + \text{sgn}(CG_i - k) \left(\frac{CG_i}{k} \right)^{\alpha_i}, \quad (8)$$

其中: CG_i 是引导图像 I 在像素 i 点的颜色梯度值^[23], k 是阈值, 其值被取为 $0.05 \times L$, 阈值 k 是用来决定是否像素点在边缘区域。 L 是输入图像的动态范围, ϵ 是一个小的正常数, 用来防止分母

为 0。

CG_i 能根据当前像素点的灰度突变程度公正的决定该像素点边缘信息放大力度。当像素位于图像边缘时, 边缘信息越显著, 权值 φ_i 越大, 表现为对边缘信息敏感; 当像素不在边缘时, 权值 φ_i 较小, 表现为对边缘信息不敏感。

将自适应权重因子应用在代价函数中:

$$E(a_k, b_k) = \sum_{i \in \omega_k} \left((a_k I_i + b_k - p_i)^2 + \frac{\lambda}{\varphi_i} a_k^2 \right). \quad (9)$$

引导滤波的线性系数 a_k 和 b_k 可以被计算为:

$$a_k = \frac{\frac{1}{|\omega|} \sum_{i \in \omega_k} I_i p_i - \mu_k \bar{p}_k}{\sigma_k^2 + \frac{\lambda}{\varphi_i}}, \quad (10)$$

$$b_k = \bar{p}_k - a_k \mu_k, \quad (11)$$

其中: μ_k 和 σ_k^2 分别为引导图像 I 在 ω_k 中的均值和方差, $|\omega|$ 是在 ω_k 中的像素数, $\bar{p}_k = \frac{1}{|\omega|} \sum_{i \in \omega_k} p_i$ 是在 ω_k 中 p 的均值。已经得到引导滤波的线性系数 a_k 和 b_k 的值, 则输出图像 q_i 最终可以由式 (12) 得到:

$$q_i = \bar{a}_i I_i + \bar{b}_i. \quad (12)$$

由于暗通道先验的简易性和有效性, 原始传输图根据暗通道先验来估计。原始传输图可以进一步被式 (9) 来平滑, 得到最终的传输估计图。根据已求得的大气光值 A 和传输图 $t(x)$ 将其代入式 (4) 即可求得无雾图像 $J(x)$, 如图 2 所示。

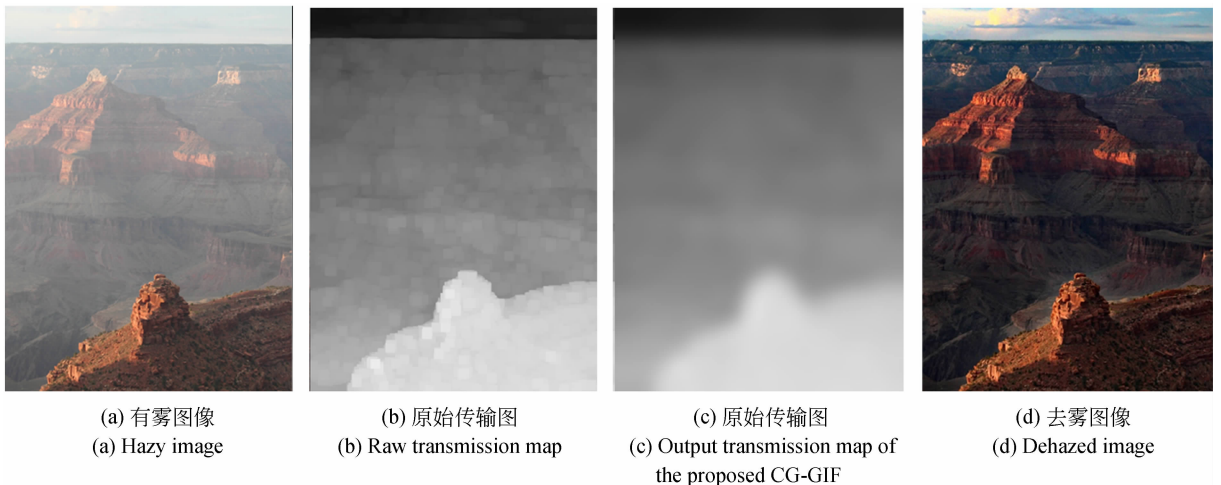


图 2 运用改进后的引导滤波来精细传输图的图解

Fig. 2 Illustration of the proposed improved GIF by using it to refine the transmission map of a haze image

4 实验结果

为了证明提出的方法的有效性,通过现阶段的去雾算法对多个不同的有雾图像进行了实验比较,实验结果由两部分组成,第一部分讨论去雾效果图比较。第二部分展现了各个去雾效果图的客观评价标准的比较。

4.1 主观评价

在本节,提出的滤波器与引导滤波以及加权引导滤波^[24]在去雾领域进行了比较,为了公平起见,除了滤波器不同,其余参数均为相同。从图 3 可以看出本文提出的滤波器在天安门屋檐处的光晕效应得到了有效减弱,保护细节比引导滤波和加权引导滤波更好。接下来,提出的算法与三种现阶段较新的去雾算法进行航空图像实验效果比



图 3 引导滤波,加权引导滤波和我们的滤波器处理后的去雾图像比较
Fig. 3 Comparison of GIF, WGIF and proposed algorithm

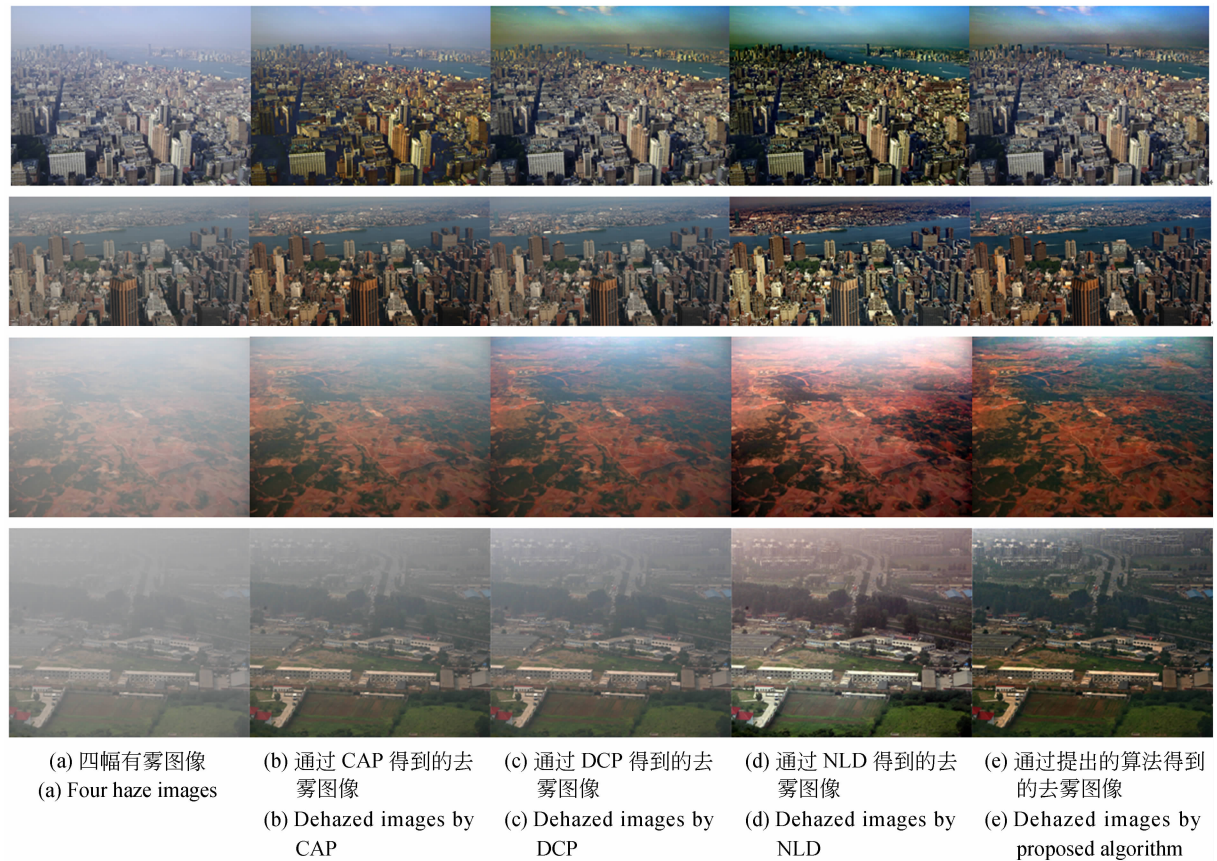


图 4 提出的去雾算法和文献[5-7]三个去雾算法的比较

Fig. 4 Comparison of the proposed haze removal algorithm and the haze removal algorithms in [5-7] via three haze images

较,所有的参数设置选取全都与这些算法原文中设置的最佳参数相同。从图 4(b)可以看出颜色衰减先验在雾不浓的情况下去雾效果还行,但在雾浓的情况下去雾效果较差。这是因为 α 和线性模型系数的值都是固定的,这些值应该根据输入图像的雾的浓度来自适应调整。从图 4(c)可以看出暗通道先验由于引导滤波的过度平滑,导致图像去雾效果不清晰。从图 4(d)可以看出非局部先验去雾效果比其他去雾算法更好,但其可能发生错误的将像素聚类到雾霾线的情况,这将导

致颜色失真。可以看出本文算法产生了更好的去雾效果,去雾图像颜色更为可靠,光晕更少。

4.2 客观评价

表 1 展示了提出的方法和现阶段去雾算法的客观评价指标^[25]比较,从中可以看出提出的算法有最好的 e, r 和 IVM,对于 σ ,提出算法的结果不是最好就是第二好的结果。从客观评价指标对比来看,提出的算法无论是边缘细节还是可视性来说,都比现阶段算法效果好,但对于某些图像去雾后饱和度略差。

表 1 客观评价指标比较

Tab. 1 Results of height measurement

(mm)

有雾图像	算法	e	r	σ	IVM	有雾图像	算法	e	r	σ	IVM
1	CAP	1.272 6	1.021 4	0.000 4	7.897 4	3	CAP	1.443 3	0.832	0.007 3	8.318 6
	DCP	1.823 8	1.467 5	0.000 6	8.569 1		DCP	0.810 4	1.429 8	0.001 8	7.586 5
	NLD	6.043 5	1.583 9	0.005 4	9.598 4		NLD	1.431 3	1.475 9	0.012 3	8.485 5
	Ours	6.487 4	1.763 2	0.000 3	9.654 6		Ours	1.587 9	1.814 8	0.001 5	8.550 8
2	CAP	20.960 7	0.938 9	0.052 1	8.593 4	4	CAP	14.175 8	1.223	0.008 1	6.044 8
	DCP	21.514 1	1.682 3	0.015 1	8.743 1		DCP	26.555	1.810 3	0.000 4	8.919 6
	NLD	20.794 8	2.45	0.005 9	8.869 4		NLD	26.491 7	2.050 4	0.003 7	9.031 2
	Ours	21.851 9	2.616 6	0.013	8.972 6		Ours	28.551 3	2.593 9	0.001 7	9.442 4

5 结 论

在本文中,对暗通道先验算法进行了改进。首先,提出的方法对有雾图像的暗通道进行改进,改为不重叠区域,将不重叠的暗通道进行四叉树细分来估计大气光值。其次,本文提出了引入了一个自适应权重到引导滤波中,提出的

滤波器保边效果更好,光晕现象较小且不出现过度平滑现象。本文方法产生了视觉上非常令人满意的结果,因此更加有利于在航空图像成像系统中的应用。此外,除了单幅图像去雾,改进后的滤波器还可以应用到许多其它的领域,比如去噪、细节增强、高动态范围压缩、抠图等领域的研究。我们将在未来的科研中研究这些领域的应用。

参考文献:

[1] 王一斌,伊诗白,吕卓纹. 自适应背景光估计与非局部先验的水下图像复原[J]. 光学 精密工程, 2019, 27(2):499-509.
WANG Y B, YI SH B, Lü ZH W. Under image restoration with adaptive background light estimation and non-local prior[J]. *Opt. Precision Eng.*,

2019, 27(2):499-509. (in Chinese)
[2] 刘坤,毕笃彦,王世平,等. 基于稀疏特征提取的单幅图像去雾[J]. 光学学报, 2018, 38(3):0310001.
LIU K, BI D Y, WANG SH P, *et al.*. Single image dehazing based on sparse feature extraction[J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(3):0310001. (in Chinese)
[3] WANG Y, FU F F, LAI F CH, *et al.*. Haze removal algorithm based on single images with chro-

- matic properties [J]. *Signal Processing: Image Communication*, 2019, 72: 80-91.
- [4] ZHU Q, MAI J, SHAO L. A fast single image haze removal algorithm using color attenuation prior[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2015, 24(11): 3522-3533.
- [5] BERMAN D, TREIBITZ T, AVIDAN S. Non-local image dehazing[C]. *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2016: 1674-1682.
- [6] BERMAN D, TREIBITZ T, AVIDAN S. Air-light estimation using haze-lines [C]. *IEEE International Conference on Computational Photography (ICCP)*, 2017: 1-9.
- [7] KAIMING H, JIAN S, XIAOOU T. Single image haze removal using dark channel prior [C]. *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2009: 1956-1963.
- [8] HE K, SUN J, TANG X. Guided image filtering [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2013, 35(6): 1397-1409.
- [9] ZHU M, HE B, WU Q. Single image dehazing based on dark channel prior and energy minimization[J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 2018, 25(2): 174-178.
- [10] LI J Y, HU Q W, AI M Y. Haze and thin cloud removal via sphere model improved dark channel prior[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2019, 16(3):472-476.
- [11] WANG F P, WANG W X. Road extraction using modified dark channel prior and neighborhood FCM in foggy aerial images[J]. *Multimedia Tools & Applications*, 2018, 78(7):1-18.
- [12] MA N J, XU J B, LI H CH. A fast video haze removal algorithm via dark channel prior[J]. *Procedia Computer Science*, 2018, 131:213-219.
- [13] PENG L T, LI B. Single image dehazing based on improved dark channel prior and unsharp masking algorithm [C]. *Intelligent Computing Theories and Application. ICIC 2018. Lecture Notes in Computer Science*, 2018:10954.
- [14] XIN X, YANG C, LI CH CH, *et al.*. Low visibility license plate area detection based on dark channel prior method and top hat operation[C]. *2018 International Conference on Smart Grid and Electrical Automation (ICSGEA)*, 2018.
- [15] YUE B X, LIU K L, WANG Z Y, *et al.*. Accelerated haze removal for a single image by dark channel prior[J]. *Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering*, 2019, 20(8): 1109-1118.
- [16] 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.
DENG L. Adaptive image dehazing for bright areas based on global dark channel prior[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(4): 893-901. (in Chinese)
- [17] R. HIDE. Optics of the atmosphere: scattering by molecules and particles [J]. *Physics Bulletin*, 1977, 28(11):521.
- [18] 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.
- [19] NAYAR S K, NARASIMHAN S G. Vision in bad weather [C]. *Proceedings of the Seventh IEEE International Conference on Computer Vision*, 1999, 2: 820-827.
- [20] KIM J H, SIM J Y, KIM C S. Single image dehazing based on contrast enhancement[C]. *IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*, 2011, (5): 1273-1276.
- [21] ZIHONG CHEN, DEXIANG ZHANG, YAO XU, *et al.*. Research of polarized image defogging technique based on dark channel priori and guided filtering[J]. *Procedia Computer Science*, 2018, 131:289-294.
- [22] 武昆, 韩广良, 杨航, 等. 多尺度引导滤波及其在去雾中的应用[J]. *光学精密工程*, 2017, 25(8): 2182-2194.
WU K, HAN G L, YANG H. Multi-scale guided filter and its application in image dehazing [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2017, 25(8): 2182-2194. (in Chinese)
- [23] GONZALEZ R C, WOODS R E, EDDINS S L. *Digital Image Processing Using Matlab* [M]. 2004.
- [24] LI Z, ZHENG J, ZHU Z, *et al.*. Weighted guided image filtering [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2015, 24(1): 120-129.

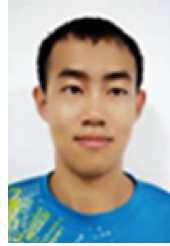
- [25] YU X, XIAO C, DENG M, *et al.*. A classification algorithm to distinguish image as haze or non-haze[C]. *IEEE International Conference on Image & Graphics*, 2011, (8):286-289.

haze[C]. *IEEE International Conference on Image & Graphics*, 2011, (8):286-289.

作者简介:



韩昊男(1993-),男,吉林白山人,博士研究生,2016年于哈尔滨工业大学获得理学学士学位,主要从事计算机视觉和图像处理方面的研究。E-mail: hanhaonan16@mails.ucas.edu.cn



吕建威(1993-),男,辽宁大连人,博士研究生,2016年于大连理工大学获得理学学士学位,主要从事计算机视觉和图像处理方面的研究。E-mail: 1637804619@qq.com



钱锋(1987-),男,湖南长沙人,博士研究生,2011年于中国科学技术大学获得工学学士学位,主要研究方向为图像处理与目标识别。E-mail: zilgard@126.com



张葆(1964-),男,研究员,1989年获长春理工大学理学学士学位,1994年获长春理工大学理学硕士学位。2004年在中国科学院长春精密机械与物理研究所获得博士学位。2004年5月至8月,曾任澳大利亚悉尼大学、阿德莱德大学高级访问学者。主要研究方向:图像处理、光学设计、目标识别与跟踪。E-mail: zhangb@ciomp.ac.cn