

文章编号: 2096-1618(2021)04-0390-06

一种结合物理模型和景深估算的图像去雾算法

叶开^{1,3}, 丁妍^{2,3}

(1. 民航西南空管局气象中心, 四川 成都 610202; 2. 山西省大气探测技术保障中心, 山西 太原 030002; 3. 成都信息工程大学电子工程学院, 四川 成都 610225)

摘要: 图像去雾是图像处理和计算机视觉领域中的一个重要课题。为解决现有去雾算法容易造成颜色失真的问题, 提出一种结合物理模型和景深估算的去雾方法。首先, 采用基于四叉树细分的方法估算大气光值; 然后, 通过颜色衰减先验建立线性模型, 根据景深获得自适应的大气散射系数和透射率; 最后, 利用大气散射模型得到无雾图像。实验结果证明: 在视觉效果方面, 去雾算法效果明显。在客观指标方面, 利用 He、Meng、Zhu 方法及文中方法对 5 幅不同图像进行去雾, 文中均方误差 (MSE) 分别比其他 3 种图像去雾算法中最低的值降低了 13%、78%、23%、25%、75%, 峰值信噪比 (PSNR) 则分别提高了 4%、31%、5%、8%、31%。

关键词: 图像去雾; 景深; 大气光值; 透射率; 大气散射系数

中图分类号: TP391.4

文献标志码: A

doi: 10.16836/j.cnki.jcuit.2021.04.007

0 引言

由于雾天大气颗粒对光的吸收和散射, 室外视觉系统拍摄到的图像质量严重降低, 如图像颜色失真、清晰度低、对比度下降等问题, 直接影响和制约了室外视觉系统对图像的采集, 更不利于对图像信息的后续提取和研究^[1-2]。因此对有雾的图像去雾, 得到清晰无雾的图像, 具有极为重要的意义^[3-5]。

近年来, 国内外针对单幅图像去雾的研究有较大进展, 其方法主要可以分为有雾图像增强和有雾图像复原两类^[6-9]。传统的图像增强去雾算法包括直方图均衡化方法、同态滤波算法、Retinex 算法、小波变换等, 这类算法通过增强图像对比度来恢复图像, 没有从图像降质的根本原因出发, 去雾不彻底, 且运算量较大。基于图像复原的算法则是通过分析图像退化的物理公式, 建立大气散射模型, 从而达到去雾效果。在实际处理中, 单一的降质图像没有附加任何景深或大气光的信息。由于已知信息不足, 因此大都需要利用某种先验理论或一些约束条件对图像去雾。Fattal^[10]通过把场景光分解成透射和反射来估算场景光强, 继而恢复无雾图像, 但该方法不能很好地处理浓雾图像。

He 等^[11]提出了一种基于暗通道先验的去雾方法, 该方法实际上是一种统计意义上的算法, 通过总结大量室外无雾的图像, 发现在无雾图像的局部区域存在一些像素, 这些像素中至少有一个颜色通道的亮度值非常低。该方法最初求取透射率时会出现块效应现象, 后续对这个问题进行了优化, 通过采用引导滤波得到细化的透射率图^[12-13]。基于暗通道先验的去雾算法是近几年公认的最简单有效的去雾方法之一, 对大

部分非天空区域都具有较好的去雾效果, 但该先验理论不适用于天空等明亮区域, 所以会造成局部颜色失真。Kim 等^[14]利用局部对比度增强和去雾模型方法, 有效减少了伪影, 缺点是时间复杂度较高。Meng 等^[15]结合透射率图固有的约束和相邻像素之间的约束关系, 通过优化透射率模型进行去雾处理, 该方法同样存在颜色失真的现象。Tang 等^[16]基于随机森林的回归框架, 通过研究有雾图像中与雾相关的特征, 提高透射率的估算精度, 但训练随机森林的前提是基于景深与纹理不相关的假设, 故训练后的模型具有一定的场景局限性。Zhu 等^[17]对室外有雾图像做大量的实验后, 发现雾的浓度与景深成正相关, 而雾的浓度又与亮度和饱和度之差成正比, 提出了一种基于颜色衰减先验的图像去雾算法。Jiang 等^[18]选择并研究了具有雾相关特征的多项式回归模型, 例如暗通道图像, 饱和度值和色度。由于基于代理模型的去雾算法仍然采用 He 的方法获取大气光值, 也会导致高亮度或白色区域的大气光值估算误差大。Raikwar 等^[19]在估算景深之前引入了基于颜色衰减的线性深度模型, 但该方法是基于散射是均匀的这一假设。Sebastian 等^[20]采用多层感知器从最小通道计算透射率图, 并使用对比度拉伸技术来改善恢复图像的动态范围, 然而这种方法依赖于训练数据量, 并且缺乏物理解释。

为更好改善去雾效果, 通过分析以上算法的优缺点, 以颜色衰减先验理论为基础, 提出了一种快速有效的去雾方法。首先, 通过基于四叉树细分的方法估算大气光值; 然后, 根据颜色衰减先验理论建立线性模型, 估算有雾图像的景深, 并对景深进行最小值滤波和引导图像滤波; 再从景深获取自适应的大气散射系数, 并估算透射率值; 最后, 根据大气散射模型, 利用得到的大气光值和透射率值, 恢复无雾图像。

1 基本原理

1.1 大气散射模型

在计算机视觉和计算机图形中,下述公式所描述的大气散射模型被广泛使用^[21-22]:

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

$$t(x) = e^{-\beta d(x)} \quad (2)$$

式(1)中, $I(x)$ 表示待去雾的图像, $J(x)$ 表示恢复后的无雾图像, A 为大气光值, $t(x)$ 为传播介质的透射率。式(1)中右边的第一项指目标物发出的光线在介质中传播最终到达相机的强度,右边的第二项指大气环境背景光在传播中被散射进入相机的强度。式(2)中, β 表示大气散射系数,在大气均匀情况下可以认为是固定值,但由于雾的浓度不同,在不同区域可能有所不同。 $d(x)$ 表示景深。联立式(1)、(2),求出 A 和 $d(x)$ 即可得到无雾图像。

1.2 颜色衰减先验

颜色衰减先验是 Zhu 等^[17]提出的一个简单有效的先验理论。通过在许多有雾的图像上做大量的实验,进行统计分析,发现有雾图像的一个规律,即对于室外有雾图像来说,雾的浓度与像素亮度和饱和度之差成正相关。又由于雾的浓度与景深成正相关,于是三者关系可以描述为:

$$d(x) \propto c(x) \propto V(x) - S(x) \quad (3)$$

其中, $d(x)$ 为像素点的景深, $c(x)$ 为像素点的雾浓度, $V(x)$ 为像素亮度, $S(x)$ 为像素饱和度。当然,式(3)是一个初始化的假设,并不能精确表示 d, V 和 S 之间的关系。具体的线性关系将进一步定义。

2 本文方法

式(1)给出了大气散射模型,由于基于大气散射模型的去雾算法主要集中在如何更精确估算透射率和大气光值,本文的去雾方法也着重在改进这两个未知量的求解方法。本文方法的完整步骤如图 1 所示。该方法包括 4 个步骤:大气光值估算,景深估算,透射率估算和无雾图像恢复。

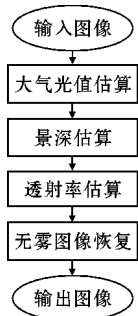


图 1 本文图像去雾算法步骤

2.1 大气光值估算

在传统的单幅图像去雾算法中,大气光通常直接采用图像中最亮的像素^[23],但图像中局部的高亮度或白色区域会导致大气光值的错误估算。He 等^[11]和 Jiang 等^[18]使用暗通道图像获得大气光值。该方法首先定位暗通道图像中具有较高亮度值的 0.1% 像素,然后利用位置信息,将位于原始图像上相同位置的像素的最高亮度值选择为大气光值。由于暗通道图像计算容易受块尺寸的影响,所获得的大气光的精度较低,导致去雾图像太暗,且某些区域颜色失真。

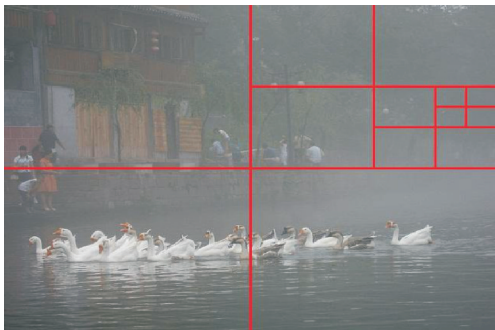
根据在有雾区域中,图像像素值的方差一般较低这一事实,借鉴文献[14]提到的一个更具有鲁棒性的基于四叉树的大气光值估算方法。利用均值和方差,排除差异较大的区域,从全局搜索这一角度选择最佳的大气光值。

将原始图像分为 4 个大小相同的矩形区域。接着将每个区域的平均像素值减去该区域的标准差,得到该区域的值。再将值最大的区域等分 4 个小区域。重复以上的步骤,直到最大的值所在区域的大小低于预先设定的阈值,则取该区域的最亮点作为大气光值。

为了说明本文大气光值估算的优势,分别利用 Zhu 方法和本文方法进行大气光值估算,如图 2 所示。由于图像中白色部分的干扰,使用 Zhu 方法将预期的天空区域错误定位在了图中的鹅上(图 2a)。通过使用本文的四叉树细分方法(图 2b),可以排除白色区域的影响,有效地改善大气光的估算结果。



(a) Zhu 方法



(b) 本文方法

图 2 大气光值估算

2.2 景深估算

亮度和饱和度可以在某种程度上代表雾的总散射,因此可以通过训练线性模型来获得景深。该方法的问题在于训练数据的不足,即对于相同的室外场景但同时具有不同程度雾的图像。Tang 等^[16]提出了一种基于原始无雾图像的雾图合成方法来解决这个问题。在 Tang 的方法中,用于训练场景深度模型的训练数据来自目标函数,模型学习较有效,但仅对某些特定场景有效,如前面所述。

根据颜色衰减先验建立景深的线性模型^[17],公式如下:

$$d(x) = \theta_0 + \theta_1 V(x) + \theta_2 S(x) + \varepsilon(x) \quad (4)$$

式中, θ_0 、 θ_1 、 θ_2 表示未知的线性系数, $\varepsilon(x)$ 代表该线性模型的随机误差,用期望值为 0、方差为 σ^2 的高斯分布函数表示。通过对 500 个包含 1.2 亿个场景点的样本来训练线性模型,求得最佳的学习结果为 $\theta_0 = 0.121779$,

$\theta_1 = 0.959710$, $\theta_2 = -0.780245$, $\sigma = 0.041337$ ^[17]。这些参数也将应用于估算本文有雾图像的景深。

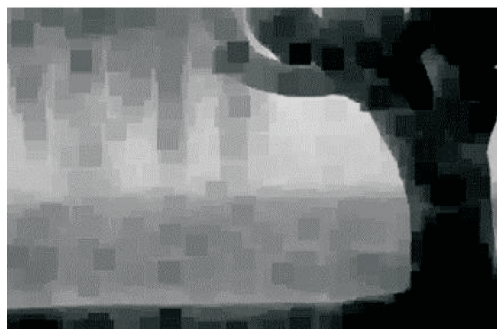
由于该线性模型的建立主要依赖于图像颜色信息,因此存在一定缺陷。当原本有雾图像中存在过多的白色景物时,线性模型效果不理想。因为白色景物具有亮度大、饱和度小的特征,所以该模型会误将白色景物判断为是景深较大的目标。为了减小这样的景深偏差,采用相邻像素景深相同的假设,利用最小值滤波得到像素的景深。又因为最小值滤波后会引起景深图出现块效应,因此再采用一次引导滤波进一步对景深图进行优化。图 3 分别给出了有雾图像,初始的景深图,最小值滤波后的景深图以及引导图像滤波后的景深图。两只白鹅在图 3(a) 中为近处的目标物,但是在图 3(b) 的初始景深图中,被当成了远距离目标。在最小值滤波和引导滤波之后,白鹅造成的影响几乎可以被消除,如图 3(d) 所示。



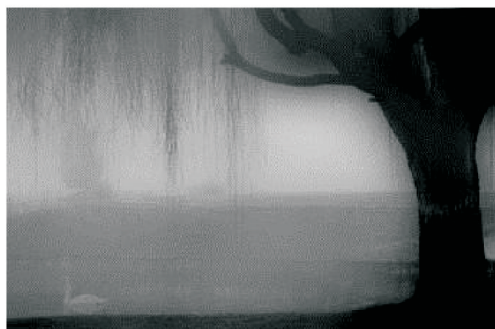
(a) 有雾图像



(b) 初始景深



(c) 最小值滤波后的景深



(d) 引导滤波后的景深

图3 景深的估算

2.3 透射率估算

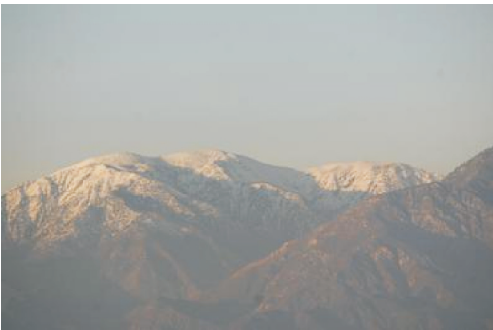
由于大气散射系数 β 表示单位体积大气颗粒对各个方向光的散射能力,单位体积大气颗粒越多,散射能力越强。单位体积大气颗粒的多少表示雾的浓度大小。通常情况下,一幅有雾图像,景深越大,雾的浓度越大,大气散射能力越强。换句话说,大气散射系数 β 是自适应的,而不是固定的。根据日光物理模型^[24-25],对大气散射系数 β 值进行自适应选取,建立一个大气散射系数与景深的函数关系式,即

$$\beta(x) = a \cdot e^{b \cdot d(x)} \quad (5)$$

其中, $\beta(x)$ 表示像素点 x 处的自适应大气散射系数, $d(x)$ 像素点 x 处的景深, a 和 b 均为未知参数。根据胡雪薇等^[24]实验结果,确定了 $a = 1.2$, $b = 0.04$ 时,可以得到均方误差 (MSE) 减去结构相似度 (SSIM) 的最小值,为自适应的大气散射系数的最佳参数。

通过前面对景深的估算,将景深代入式(2)即可求得透射率。为了抑制噪声,通过设定值对透射率进行约束^[26],见式(6)。图 4 给出了原始有雾图像及估算的透射率图。

$$t(x) = \min \{ \max \{ e^{-\beta(x)d(x)}, 0.1 \}, 0.9 \} \quad (6)$$



(a) 有雾图像



(b) 透射率图

图 4 透射率估算

2.4 无雾图像恢复

式(1)给出了大气散射模型公式。基于大气散射模型的去雾算法主要集中在如何准确估算大气光值和透射率值。由式(1)和(6)推导,原始图像去雾后得到的无雾图像可表示为

$$J(x)=\frac{I(x)-A(1-t(x))}{t(x)}\tag{7}$$

3 实验结果与分析

3.1 实验设计

采用目前应用最为广泛的经典去雾算法,对多幅有雾图像使用不同方法进行去雾,并选择与原始图像的 MSE 和峰值信噪比(PSNR)作为去雾效果的客观评价指标,从而评估原始有雾图像和去雾后的图像之间像素点的差异。根据定义,MSE 的值越小,PSNR 值越大,说明算法的去雾效果越好,保真度越高。所有的仿真实验环境均为 64 位操作系统,4.00 GB内存,Inter(R)Core(TM)i5-4200H CPU@ 2.8GHZ 处理器,编译环境为 MatlabR2015b。

3.2 结果分析

分别采用 He 方法、Meng 方法、Zhu 方法与本文算法,选取 5 幅经典的有雾图像进行去雾试验,并给出定性定量的评价。图 5 为 4 种方法下的去雾结果,图像内容分别为山峰图像、植物图像、军舰图像、玩偶图像和高楼图像。可以看出,He 方法去雾后的图像整体颜色较暗,在图 5(b)里的植物图片中,树木周围还存在不均匀的残留雾;图 5(b)的高楼图片和军舰图片中,存在光晕现象,且去雾图片缺乏真实感。Meng 方法整体效果比 He 方法好,但问题在于部分区域颜色失真较严重,比如植物图像中,墙壁的颜色偏深红色;军舰图像中,出现光晕现象;玩偶图像中,颜色偏暗,右上角部分色调偏蓝色。Zhu 方法去雾的主观效果较He方



(a)有雾图像 (b)He方法 (c)Meng方法 (d)Zhu方法 (e)本文方法

图 5 5 张不同图像的 4 种方法去雾效果对比

法和 Meng 方法有一定程度的改善,去雾后没有剧烈的色彩失真和光晕现象。但依然可以直观看出,在细节处的去雾效果不如本文方法,如在图 5(d)高楼图像中,远处的海景颜色偏深蓝,与原图色调存在差异。本文方法在主观效果减少了颜色失真,更接近于雾图的色调,且去雾后的图片清晰自然。

表 1 和表 2 分别给出了 5 幅不同的有雾图像在通过 He 方法、Meng 方法、Zhu 方法及本文方法下去雾结果与原始图像的定量评价指标,表 1 为 MSE 值,表 2 为 PSNR 值。其中,加粗的字体为每幅图像通过不同去雾算法产生的 MSE 的最小值和 PSNR 的最大值,即 4 种算法的最优指标。表 1 和表 2 中最右一列给出了本文方法分别比其他三者中数据最优的算法的提升比例。由表 1、2 可见,本文方法得到的去雾 MSE 值均低于其他 3 种经典去雾算法的 MSE 值,PSNR 值均高于其他的 PSNR 值,优化程度较为明显。因此,相比之下,本文方法从定量评价指标上有一定的优越性,恢复到无雾图片保真度最高。

表 1 不同方法的 5 张图像 MSE 对比

	He	Meng	Zhu	本文方法	提升比例/%
山峰	5525	3660	1776	1541	13
植物	1684	1037	509	112	78
军舰	4146	3724	382	294	23
玩偶	6648	5319	1378	1027	25
高楼	3311	1877	692	172	75

表 2 不同方法的五种图像 PSNR 对比

	He	Meng	Zhu	本文方法	提升比例/%
山峰	10.71	12.50	15.64	16.25	4
植物	15.87	17.97	21.07	27.64	31
军舰	11.95	12.42	22.31	23.45	5
玩偶	9.90	10.87	13.42	18.01	8
高楼	12.93	15.40	19.73	25.77	31

4 结束语

提出了一种结合物理模型和景深估算的图像去雾方法。首先,通过四叉树细分算法估算大气光值;然后,根据雾的总散射和亮度与饱和度之间的差异的先验,建立线性模型,估算原始图像的景深,并通过最小值滤波和引导图像滤波对其进行优化,利用景深求解大气自适应散射系数,并计算透射率;最后,利用大气散射模型恢复无雾图像。本文方法可以较理想地对图像进行去雾,特别是对于那些包含天空背景和明亮物体的有雾图像。与其他 3 种方法相比,本文方法去雾

颜色失真小,恢复得到的图像清晰度高。客观指标方面,本文方法的 MSE 和 PSNR 也在一定程度有所提升。但仍然存在有待解决的问题。大气散射模型是基于光被大气中的微小固体颗粒散射的前提,在浓雾条件下,光可能会被大气中的微小颗粒多次散射。因此,需要建立多重散射现象的物理模型,这是未来研究的方向。

参考文献:

[1] 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.

[2] Xu Y, Wen J, Fei L k, et al. Review of video and image defogging algorithms and related studies on image restoration and enhancement[J]. IEEE Access,2016,4(1):165-188.

[3] 吴迪,朱青松. 图像去雾的最新研究进展[J]. 自动化学报,2015,41(2):221-239.

[4] 徐东彬,廖庆敏. 图像去雾技术研究进展[J]. 中国图像图形学报,2011,16(9):1561-1576.

[5] 陈丹丹,陈莉,张永新,等. 修正大气耗散函数的单幅图像去雾[J]. 中国图像图形学报,2017,22(6):787-796.

[6] Park D, David K, Jeon C, et al. Fast single image de-hazing using characteristics of RGB channel of foggy image [J]. IEICE Transactions on Information and Systems,2013(8):1793-1799.

[7] Zeng L, Dai Y Z. Single image dehazing based on combining dark channel prior and scene radiance constraint [J]. Chinese Journal of Electronics, 2016,25(6):1114-1120.

[8] 王平,张云峰,包芳勋. 基于雾天图像降质模型的优化去雾方法[J]. 中国图像图形学报,2018,23(4):605-616.

[9] Zhu M Z, He Bi W, Wu Q. Single image dehazing based on dark channel prior and energy minimization[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2017, 25(2):174-178.

[10] Fattal R. Single image dehazing[J]. ACM Transactions on Graphics,2008,27(3):1-9.

[11] 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.

[12] He K M, Sun J, Tang X O. Guided image filtering [J]. IEEE Transactions on Software Engineering, 2013, 35(6):1397-1409.

- [13] Lee S, Yun S, Nam J, et al. A review on dark channel prior based image dehazing algorithms [J]. EURASIP Journal on Image and Video Processing, 2016, 1(4): 1–23.
- [14] Kim J, Jang W, Sim J, et al. Optimized contrast enhancement for real-time image and video dehazing [J]. Journal of Visual Communications and Image Representation, 2013, 24(3): 410–425.
- [15] Meng G F, Wang Y, Duan J Y, et al. Efficient image dehazing with boundary constraint and contextual regularization [C]. Proc. the IEEE International Conference on Computer Vision, Sydney, Australia, 2013: 617–624.
- [16] Tang K T, Yang J C, Wang J. Investigating haze-relevant features in a learning framework for image dehazing [C]. Proc. Computer Vision and Pattern Recognition. IEEE, 2014: 2995–3002.
- [17] Zhu Q S, Mai J M, Shao L. A fast single image haze removal algorithm using color attenuation prior [J]. IEEE Trans Image Process, 2015, 24(11): 3522–3533.
- [18] Jiang Y T, Sun C M, Zhao Y, et al. Fog density estimation and image defogging based on surrogate modeling for optical depth [J]. IEEE Trans Image Process, 2017, 26(7): 3397–3409.
- [19] Raikwar S, Tapaswi S. An improved linear depth model for single image fog removal [J]. Multimedia Tools and Applications, 2017, 77(12): 1–26.
- [20] Sebastian S, Ivan C, Juan-Manuel R. Single image dehazing using a multilayer perceptron [J]. Journal of Electronic Imaging, 2018, 27(4): 43022.
- [21] Narasimhan S, Nayar S. Contrast restoration of weather degraded images [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2003, 25(6): 713–724.
- [22] Narasimhan S, Nayar S. Vision and the atmosphere [J]. International Journal of Computer Vision, 2002, 48(3): 233–254.
- [23] Tan R. Visibility in bad weather from a single image [C]. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2008: 1–8.
- [24] 胡雪薇, 李其申. 动态大气散射系数的颜色衰减先验图像去雾 [J]. 电视技术, 2017, 41(S2): 122–125.
- [25] Preetham A, Shirley P, Smits B. A practical analytic model for daylight [C]. In SIGGRAPH, 1999: 91–100.
- [26] Berman D, Treibitz T, Avidan S. Non-local image dehazing [C]. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2016: 1674–1682.

A Dehazing Method Combining Physical Model and Depth Map Estimation

YE Kai^{1,3}, DING Yan^{2,3}

(1. Meteorological Center of Southwest Air Traffic Management Bureau, Chengdu 610202, China; 2. Shanxi Atmospheric Detection Technology Support Center, Taiyuan 030002, China; 3. College of Electronic Engineering, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China)

Abstract: Image dehazing is an important topic in the field of image processing and computer visualization. An improved image dehazing method based on color attenuation prior is proposed in this paper to address the problem of the existing dehazing algorithms that are prone to color distortion. First, a method based on quad-tree subdivision is used to estimate the atmospheric light. Then, a linear model is established using color attenuation prior, and adaptive atmospheric scattering coefficients and a transmission map are obtained according to the map depth map. Finally, a haze-free image is obtained from the atmospheric scattering model. To compare the effect of the proposed method with other existing methods, five different images are dehazed with the proposed algorithm and three other methods (He, Meng and Zhu methods). In the experiments, the proposed algorithm shows better dehazing effect than the other three methods. The mean square error (MSE) of the five images with the proposed method decreased by 13%, 78%, 23%, 25%, 75%, respectively, compared to the lowest MSE of the other three methods. The peak signal-to-noise ratios (PSNR) of the five images with the proposed method increased by 4%, 31%, 5%, 8%, 31%, respectively, compared to the highest PSNR of the other three methods.

Keywords: image dehazing; depth map; atmospheric light; transmission map; atmospheric scattering coefficient