

图像去雾霾算法的研究现状与展望

苗启广 李宇楠

(西安电子科技大学计算机学院 西安 710071)

摘要 雾霾天气下拍摄的图像往往会因空气中的气溶胶粒子散射而降质,并因此影响后续的室外计算机视觉系统的应用。为此,研究者提出了大量方法来复原雾霾图像的质量。文中归纳总结了图像去雾霾方法的研究现状,重点研究和分析了基于图像增强和基于物理模型这两大类方法,深入探讨了其中一些已被广泛认可的经典算法的优劣,并分析了几种雾霾天气复原图像客观评价的方法。最后,提出了图像去雾霾算法未来的几种研究思路,并展望了未来的发展趋势。

关键词 图像去雾霾,图像增强,大气散射模型,暗通道,机器学习

中图分类号 TP311 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2017.11.001

Research Status and Prospect of Image Dehazing

MIAO Qi-guang LI Yu-nan

(School of Computer Science and Technology, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract Images captured under haze are always degraded due to the suspending aerosols in air, which can also affect their applications in the outdoor computer vision system. Then researchers proposed a lot of algorithms for image restoration. Current image dehazing algorithms were analyzed, including two categories of image enhancement based and physical model based. Then the advantages and disadvantages of several highly applied algorithms were discussed, and some quantity evaluation methods were introduced. Finally, some possible study ways and the trend of development were given.

Keywords Image dehazing, Image enhancement, Atmospheric scattering model, Dark channel prior, Machine learning

1 引言

近年来,雾霾天气在我国呈多发态势,并在我国东北、华北、华中、华东等广大区域持续蔓延。如图1所示,在雾霾等天气状况下,由于空气中悬浮的各种气溶胶粒子对光线造成大幅散射、折射,使得原本应当进入成像设备的景物所反射的光线沿光程而逐渐衰减;同时,直射太阳光、漫反射天光等环境光的散射又会混入成像设备,导致室外图像的质量有所下降,远景处物体的细节信息有所丢失,最终使得图像可提供的整体信息量大幅减少,并进一步影响后续的交通监控、目标跟踪等计算机视觉系统的应用。因此,通过一定的图像处理技术去除雾霾等天气的影响,有效提升图像的质量,具有广泛的应用前景和重要的社会意义。

对图像去雾霾的研究最早可追溯到20世纪50年代。针对遥感图像中由于云雾影响而造成的图像不清晰的问题,美国学者展开了对图像去天气影响的研究。随后,对普通成像的去雾霾研究也逐渐得到发展。目前,对图像的去雾霾工作

主要可分为基于图像增强和基于物理模型两大类。根据具体所使用方法的不同,基于图像增强的方法又可进一步分为:基于直方图均衡化、基于Retinex和基于小波变换等方法;而基于物理模型的方法又可具体分为:基于额外信息、基于图像差异、基于单幅图像等方法。具体的分类关系如图2所示。



图1 雾霾天气的视觉效果

到稿日期:2016-10-06 返修日期:2016-12-15 本文受国家自然科学基金(61472302, U1404620, 61672409),模式识别国家重点实验室开放课题基金(201600031),中央高校基本科研业务费专项资金(JB150317),陕西省自然科学基金(2010JM8027),航空科学基金(2015ZC31005)资助。

苗启广(1972—),男,博士,教授,CCF会员,主要研究方向为智能图像处理与机器学习、高性能计算, E-mail: qgmiao@163.com; 李宇楠(1992—),博士生,主要研究方向为智能图像处理与机器学习。

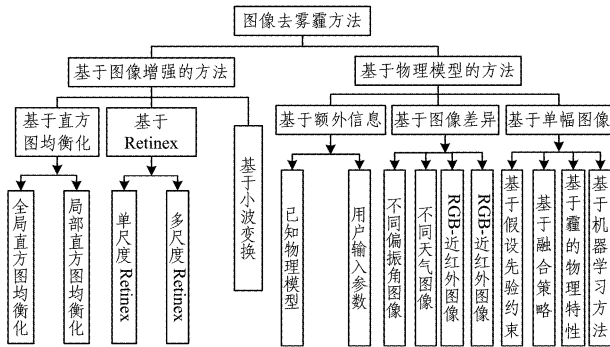


图2 图像去雾霾方法的分类

2 图像去雾霾方法的分类

2.1 基于图像增强的方法

早期的图像去雾霾方法大多依靠图像处理中的图像增强来完成。由于雾霾天气图像降质问题中最突出的就是图像的亮度和对比度有所下降,因此研究者们首先想到通过直方图均衡化来解决这一问题。直方图均衡化的核心思想是将原本聚集在某个较小区间的灰度直方图加以扩展,使之在全部灰度范围内均匀分布,以此达到提升图像对比度的目的。对于雾霾场景较为单一、没有大量景深变化的图像而言,全局直方图均衡化的方法能达到一定的增强对比度的效果,复原图像在视觉上也有所提升。然而,由于全局直方图均衡化是对整幅图像进行宏观操作,因此并不能很好地反映出图像某些局部细节的灰度变化。此外,大部分雾霾图像的对比度减弱区域往往集中于远景处被雾霾影响较为严重的地方,这些区域的像素数量相比整幅图像较少,且灰度也相对集中在值较高的区域,故全局直方图均衡化方法无法获得较好的复原效果。对此,研究者们提出了相应的改进算法。张久鹏等^[1]提出了一种基于图像反转的限制对比度自适应直方图均衡化的方法,即首先将图像进行反转,以降低图像背景区域(需要进行均衡化的区域)的亮度,随后通过在每个像素的邻域进行对比度限幅来解决噪声放大的问题,从而实现图像的均衡化操作。曹聚亮等人^[2]首先通过常规的直方图均衡化方法进行处理,然后对比处理后图像与原图的梯度差异,并以此为依据进行局部灰度的修正。

还有一些研究者则针对全局直方图均衡化存在的问题提出了局部直方图均衡化的方法,以实现局部细节增强。Kim等人^[3]提出了部分重叠子块直方图均衡化算法(Partially Overlapped Sub-block Histogram Equalization, POSHE)。在POSHE算法的基础上,艾明晶等人^[4]通过对邻域内的子块变换函数加权求和来计算当前子块的变换函数,以消除子块直方图均衡化变换的差异,达到恢复雾天图像局部细节信息的目的。祝培等人^[5]通过移动模板进行场景分割,并对模板内的区域进行块重叠直方图均衡化处理,以实现景物细节信息的有效增强。

Retinex是Land提出的一种颜色恒常知觉的计算理论,它是由视网膜(Retina)和皮层(cortex)合成的一个词语。Retinex理论说明了物体的色彩不受光照非均匀性的影响,具有一致性,因此在处理雾霾天气下由于光照差异造成的图像

对比度降低方面有较好的效果,也因此受到研究者的关注。早期,研究者们大多通过单尺度Retinex(Single Scale Retinex, SSR)^[6]进行处理。该理论认为一幅给定的图像可以被分解为入射光图像(即在物体上的光照决定了图像的动态范围)和反射图像(物体反射进成像设备的部分,体现了物体的内在属性)。SSR的目的即是通过一定的途径降低入射光图像的影响,从而使所获图像更接近保留物体本质的反射图像。基于该理论,张赛楠等人^[7]提出了一种改进算法,即用符合人眼视觉特性的中心自适应调节的拟合函数替代原本SSR的对数型调节函数,以增强雾天图像的各个颜色分量,有效扩展图像灰度的动态分布。黄黎红^[8]在HSV空间将SSR的调节函数修改为双曲正切函数,在对比度和细节增强上取得了较好的效果。在SSR理论的基础上,Rahman等人^[9]又提出了多尺度Retinex(Multi-Scale Retinex, MSR)理论,以同时保证图像的高保真度和对图像的动态范围压缩,因此,MSR相对SSR在复原雾霾图像的问题上有着更为广泛的应用。赵晓霞等^[10]提出了一种MSR的改进算法,其自适应地提升Retinex输出的变化增益,以提升图像的细节区域信息,对于复原的雾霾图像能够获得更加自然的颜色效果。芮义斌等人^[11]通过正态截取拉伸处理MSR的输出图像,对薄雾图像取得了较好的复原效果。李菊霞等^[12]提出了一种改进MSR算法,其通过幂次变换压缩图像的动态范围,用非线性变换抑制图像的高光区域,并用反锐化掩模滤波消除图像模糊,取得了一定的成果。

除此之外,针对雾霾图像中雾霾信息往往集中在图像的低频区域而景物信息集中于高频区域的特点,也有研究者利用小波变换能够在多个尺度上进行处理的优势,将小波方法与Retinex相结合来对图像进行去雾霾处理。Wang等人^[13]通过小波变换将雾霾图像进行多尺度分解,采用高通滤波器去除雾霾成分,并用非线性变化锐化高频部分,随后通过SSR对图像进行增强处理。曹永妹等^[14]将Retinex算法拓展到小波域,在不同尺度分别对雾霾和景物信息进行处理,有效提升了图像质量。

2.2 基于物理模型的方法

上述基于图像增强进行去雾霾处理的方法虽然能一定程度地提升图像的清晰度,但效果往往是有限的。事实上,雾霾的形成有一定的物理学理论基础,其对图像质量的影响也是随着距离的增加而提升的,因此如果忽略了真实图像中场景深度与雾霾的关系而以简单的图像处理的方式去除雾霾,将导致图像的远景部分不够清晰而近景部分又会因过度处理而产生失真。为此,研究者近些年逐渐将重心转移到基于物理模型的去雾霾算法上。

2.2.1 大气物理模型

1972年,McCartney提出了一个物理模型,用以表述大气散射中的成像过程^[15]。该模型表示为:

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

其中, x 表示图像中每个像素的位置; $I(x)$ 表示最终进入成像设备的光线强度,亦即图像中该点的亮度; $J(x)$ 表示该点的场景照度,即在良好的天气环境下该点进入成像设备的光强; A 表示大气散射带来的光照,可认为是无限远处的亮度; $t(x)$ 表示传输率,反映了场景照度未经散射而到达成像设备的比

例,其表达式如式(2)所示:

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

其中, β 是入射光的散射率, $d(x)$ 是该点的景深。

整个模型分为两部分:① $J(x)t(x)$ 是衰减部分,是某一场景点的照度被衰减后进入成像设备的部分,Narasimhan 等人^[16]称之为 direct transmission;② $(1-t(x))A$ 则是环境光照,是由于大气散射而进入成像设备的部分,Koschmieder^[17]称之为 airlight。环境光照的来源有很多,其中最主要的是太阳光直射和天光的漫反射。其成像过程如图 3 所示,以一个气溶胶粒子为例,物体直接进入成像设备的照度因散射衰减而逐渐减小,直射太阳光、天光等环境光照则增强了亮度。

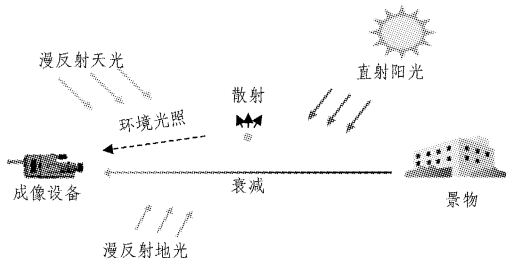


图 3 大气散射模型的图解

由于大气物理模型反映了雾霾导致的图像降质过程,因此通过反解上述模型获得的复原图像更加自然,避免了图像增强方法产生的过度处理问题。然而值得注意的是,该模型中未知参数过多,通过上述模型求解无雾霾图像,本质上是一个不定方程求解问题。因此在求解时,需要通过各种方式给出信息来消除这些未知数。

2.2.2 基于额外信息

在求解大气物理模型时,一种较为简单的办法是假定其中的未知量是已知的。在该模型中,最关键的参数是传输率 $t(x)$,它反映了图像的场景深度信息。为获取对应信息,Kopf 等人^[18]首先从 Google Earth 或者 Microsoft's Virtual Earth 等处获取了 3D 地理参考模型,并通过这些模型获得了各类 GIS 信息,如场景深度、地物纹理特征等,然后将其代入大气物理模型中来求取复原图像。Narasimhan 和 Nayar^[19]则是通过用户交互输入的方式来获取这些信息。根据他们的方法,用户首先需要交互输入图像中未被雾霾影响的区域、大气光、天空等位置,然后对应求解出模型中的各个变量,进而获取无雾霾图像。

2.2.3 基于图像差异

通过多幅图像之间的差别来获取图像的景深信息也是一种有效的解决办法。其又可以分为 3 种情况:1)利用不同天气下的图像的差异;2)利用同一场景中不同偏振角度下获取的图像差异;3)利用 RGBN 相机,通过普通图像(RGB 图像)与近红外图像的差异获取信息。

通过不同天气状况来获取图像景深信息的方法与 Kopf 通过模型提取景深信息的思路类似,只不过这种方法是通过两幅或多幅图像而不是完整的已经构建好的地理模型来估计图像的景深。以陈功等人^[20]提出的算法为例,首先他们获取了同一场景中晴天和雾天下的两幅参考图像,选取雾霾参考图像中的一个小区域中颜色不同但景深相同的两个点,由于两者深度是一致的,因此可以计算出场景深度信息和大气光

信息;然后以该场景深度为基准,计算图中每个场景点与其的比值,再在待测图像中计算该点的场景深度,并将前述比值代入待测图像中来重新计算每个场景点的深度值。Narasimhan 和 Nayar^[16]也使用了类似的方法,他们从多幅不同天气环境下获取的图像中恢复良好天气下的场景颜色,以应用到他们的色彩模型中。

Schechner 等人^[21]、Shwartz 和 Schechner^[22]则从另一个角度来获取雾霾环境中的深度,他们为成像设备安装了偏振片。光经过不同介质会发生反射和折射,且反射光和折射光会发生不同状态的偏振,而环境光照部分会随着距离的增加而增大。他们认为成像设备接收到的光线偏振主要是由这部分环境光照引起的,因此通过不同程度地旋转偏振片(一般认为是偏振方向垂直和平行于入射光平面)可以计算出环境光照,从而反演出无雾霾图像。

Feng 等人^[23]也利用了特殊相机来求取场景深度。由于近红外光的波长较长,因此它们几乎不会被散射掉,远景处的物体信息就可以得到很好的保留。他们利用 RGB 图像和近红外图像的差异估计出大气光,并进一步利用优化方法进行图像的去雾霾操作。

2.2.4 基于单幅图像

上述基于额外信息或多幅图像之间的差异进行去雾霾处理的方法虽然获得了较好的效果,但是并不易于实际应用。这个缺陷可归因于两点:1)去雾霾操作所依赖的要求过高,当这些预先要求无法满足(如所拍摄环境的地理模型尚未被构建,或是用户不具备特殊功能的成像设备)时,这些方法就会失效;2)交互方法对用户具备一定的门槛要求,比如用户需要对大气物理模型有一定的了解,并且可以手动选择图像中的未受雾霾影响等区域,如果用户的选择并不准确,将会直接影响最终的去雾霾效果。大部分实际情况下,用户往往只有一个普通的成像设备,并且希望对获取的一幅图像直接进行去雾霾处理,因此近来研究者们研究重点逐渐集中在单幅图像去雾霾的方法上。

(1) 基于假设先验或约束的方法

如前所述,由于基于大气物理模型去雾霾的方法本质上是一个不定方程求解的问题,因此在不能依靠待处理图像以外的信息来获取这些未知参数的情况下,就必须通过一些假设、先验或者约束条件来简化模型,估计这些未知量。

最早的单幅图像去雾霾方法是 Tan 等人^[24]提出的,他们首先证明了单幅图像去雾霾是一个病态问题求解的过程,然后假定空气光的色彩和亮度信息是互相独立的,并将原大气散射模型分解为亮度标量和色彩向量的乘积,再针对亮度增强的部分即原模型中的环境光照 $(1-t(x))A$ 分别估计其亮度和色彩信息,最后在雾霾图像中去除该部分后即为增强后的结果。其复原结果如图 4 所示。

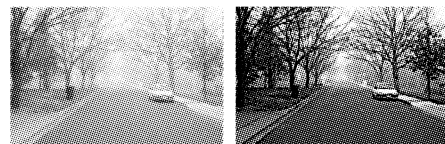


图 4 Tan 等^[24]的复原结果

随后, Tan^[25]在此基础上, 基于一般图像“晴天图像比雾霾图像对比度高”和“环境光照的变化与距离相关”这两个观测结果, 提出了一种基于马尔科夫随机场(Markov Random Field, MRF)的去雾霾方法。首先将雾霾模型构建为基于MRF的代价函数, 然后通过图割(graph-cut)或置信度传播(belief propagation)来进行优化。该方法的视觉效果较为突出, 但由于其将图像的对比度最大化, 因此往往会过处理, 且在景深突变处存在晕轮效应。Tan^[25]的结果如图5所示。

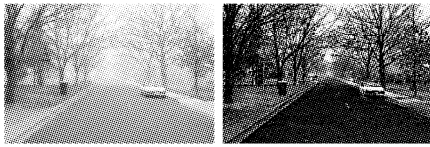


图5 Tan^[25]的复原结果

Fattal^[26]针对雾霾图像提出假设: 物体的表面着色和传输率局部统计不相关。基于该假设, 他将图像分解为有多个相同传输率的小块, 然后利用独立成分分析(independent component analysis, ICA)估计传输率。由于该方法依赖于局部统计假设, 且要求图像本身的色彩信息足够丰富, 因此当雾霾较为严重, 图像的色彩信息损失较大时, 该方法将无法正确估计传输率。其复原结果如图6所示。



图6 Fattal^[26]的复原结果

Tarel和Hautière^[27]将环境光照部分看作一种大气遮罩, 然后将去雾霾问题转化为估计该遮罩的过程。该方法可以同时适用于灰度图像和彩色图像, 然而使用中值滤波进行保边平滑处理, 在某些图像的边缘会产生一定的失真。其结果如图7所示。



图7 Tarel和Hautière^[27]的复原结果

He等^[28]在2009年的CVPR上创造性地提出了一种关于雾霾的先验: 暗通道先验。该先验是基于大量室外图像得到的一个统计先验: 对于雾霾图像, 在大多数非天空区域中, 一些像素至少有一个通道的亮度值很低, 这个通道即为暗通道。基于暗通道先验, He等通过最小化滤波求得传输图, 并通过软抠像(Softmatting)对传输图进行细化。由于软抠像的时间复杂度较高, 为满足实时性要求, He等将其替换为导向滤波^[29]。其复原效果如图8所示。

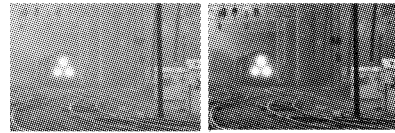


图8 He^[28]的复原结果

Kratz和Nishino^[30]通过贝叶斯概率模型将图像表述为一个马尔科夫随机场, 场景反照率和景深是其中的两个统计独立的隐参数, 可以通过求取这两个参数来获得复原图像。该方法的视觉效果较好, 然而在远景处易出现色彩偏暗等失真现象。其结果如图9所示。

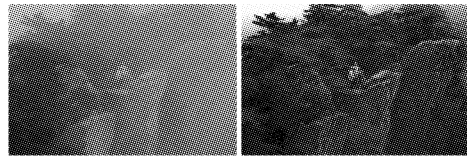


图9 Kratz和Nishino^[30]的复原结果

Meng等^[31]提出了一个几何边界约束来限制传输率的上下界, 然后将传输图的求取看作是一个最优化问题, 通过一个上下文相关的正则化表示来得到精细化的传输图。与前述方法相比, 该方法获得的复原图像能够取得非常好的复原效果; 然而对天空区域而言, 该方法往往会过度处理, 导致对应区域的传输率过低, 从而导致复原图像在该区域失真。

还有一些基于上述文献的改进方法。Sulami等^[32]根据Fattal^[26]对物体表面的着色假设, 提出了一种估计大气光的方法。他们将大气光视为一个向量, 并依次求取了其幅度和方向。在文献[27]的基础上, 禹晶等^[33]提出了一种新的大气光估计方法。根据天空部分的特性, 他们首先选取图像灰度分量中边缘像素小于阈值且亮度大于阈值的区域标记连通分量, 然后选取最大的部分来估计大气光, 随后通过双边滤波来优化传输图, 从而获得最终的无雾霾图像。在文献[28]的暗通道先验的基础上, Gibson等^[34]将用于细化传输图的软抠像算法替换为中值滤波, 以降低算法时间复杂度, 满足视频去雾霾的实时性要求; Fang等^[35]通过图像分割的方法消除了由最小化滤波带来的晕轮效应; Zhu等^[36]将图像分为天空区域和非天空区域两部分并将它们分开处理, 以减少天空区域的色彩失真问题; Park等^[37]通过优化局部传输图来避免低对比度和过饱和的问题; 陈丽等^[38]提出了一种基于Sigmoid的函数来抑制暗通道方法的晕轮效应; 郭璠等^[39]提出了一种视频去雾霾的方法, 根据大气散身物理模型, 先借助暗通道估计大气光, 然后通过帧差法检测运动目标, 并在YCbCr空间对视频背景的亮度分量进行MSR处理; 庞春颖等^[40]、孙抗等^[41]用快速双边滤波代替文献[28]中的软抠像来提升速度; 刘楠等^[42]对物理模型添加了权重参数, 以减小景深突变处的衰减, 防止复原图像中出现晕轮效应。

(2) 基于黄霾物理特性的方法

在上文中提到的单幅图像去雾霾方法中, 大多数方法都没有区分雾和霾这两个概念, 而是将其视作同样的降质现象进行处理。事实上, 雾和霾在视觉表现和物理成因上均有所

不同。由图 10 可以看出,在雾和霾环境下获得的图像是有区别的。直观而言,雾的浓度分布不均匀,因此图像并不是随着景深的增加而愈显模糊,且雾滴较大,肉眼可辨,有雾的地方很难看到原有的景物;而霾的浓度较为均匀,因此可见度基本随着景深的增加而逐渐降低,且带来了一定程度上的色彩失真,另外霾粒子很小,肉眼难以分辨。

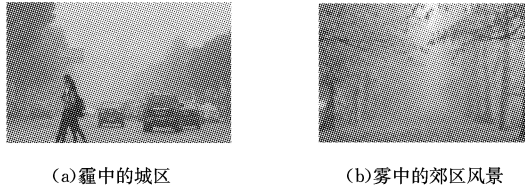


图 10 雾、霾环境下所获取图像的对比

而在物理成因上,由于相比可见光的波长范围(0.38~0.78 μm),霾的组成粒子较小(尺寸只有 $10^{-2} \sim 1\mu\text{m}$),因此瑞利散射(当粒子尺寸小于光波长的 1/10 时发生,散射率与光波长的四次方成反比)和米氏散射(粒子尺寸大于光波波长时发生,散射与光的波长基本没有联系,其方向几乎完全沿着入射方向)同时发生。由于米氏散射,远处的亮度大为降低;且由于发生多次瑞利散射,短波光已经被散射殆尽,无法到达成像设备。对于波长较长的部分,散射的程度不尽相同,且根据 CIE 1931 所制定的光度函数^[43],在良好的光照条件下,人眼对波长在 555nm 附近的黄绿色光较为敏感,因此有霾图像中较远处的部分和天空部分显示出黄色。相比之下,雾则多由微小水滴(约 1~10 μm)构成,由于其尺寸较大而只发生米氏散射,因此雾天图像并不会产生色彩失真。

根据黄霾的物理特性,Li 等人^[44]提出了一种针对黄霾图像的复原算法。首先,他们根据大量室外图像提出了一个先验,即大多数室外图像都存在天空部分。据此,通过 colorgrad 算法和亮度、饱和度阈值设定提取图像中的天空部分以估计大气光,然后以选定的大气光点作为标准进行动态的色彩平衡。相比灰度世界等静态色彩平衡方法,该方法具有自适应性,且仅使三通道在比值上达到平衡,避免了过度改变图像的亮度。随后,根据人眼对 RGB 三通道的敏感程度差异,他们切换到 HSI 空间进行处理,以防止图像出现过饱和。最后,通过双边滤波对传输图进行精细化处理。相较于其他方法,该方法对黄霾图像,特别是色彩失真较为严重的图像具有更好的处理效果。然而,虽然他们提出的先验说明大部分室外图像都具有天空部分,但对小部分不存在天空的图像而言,该方法会失效。其对黄霾图像的复原结果如图 11 所示。

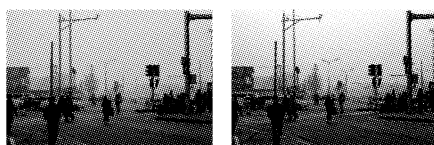


图 11 Li 等^[47]对黄霾图像的处理结果

(3) 基于融合的方法

相对之前的单幅图像去雾霾方法,Ancuti 和 Ancuti 创造性地提出了一种融合的方法^[45],其框架如图 12 所示。

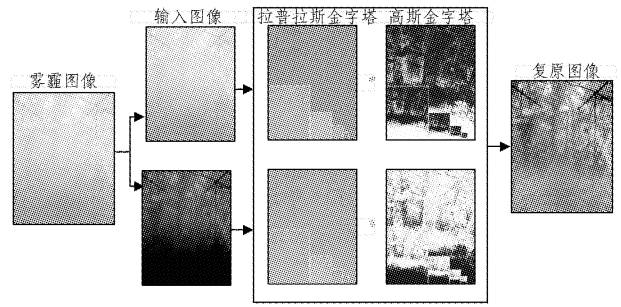


图 12 Ancuti 和 Ancuti 基于融合方法去雾霾的框架

对于一幅雾霾图像,他们首先生成白平衡和对比度增强的两幅增强图像作为融合所需的输入图像,前者着重于凸显近景处的信息,而后者则提升了远景处的细节质量;然后基于这两幅输入图像生成了亮度(luminance)、饱和度(chromatic)和显著性(saliency)3种权重,以体现输入图像细节较为清晰的区域。将3种权重直接相乘后作为最终的权重图,并进行多尺度拉普拉斯金字塔融合。融合图像由于能够同时保留近景和远景的细节信息,因此有着较好的视觉效果。然而该方法的关键是取得好的融合权重,若权重分配不佳,则有可能将两幅图像的缺点也保留在最终的复原图像中。其复原结果如图 13 所示。

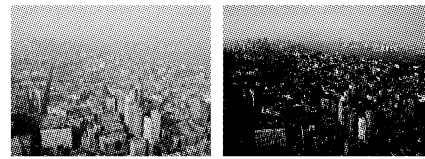


图 13 Ancuti 和 Ancuti^[48]的复原结果

郭璠等人^[46]在文献[45]的基础上对白平衡图像和对比度增强图像的获取方法进行了修正,也取得了较好的效果。

(4) 基于机器学习的方法

Tang 等人^[47]率先将机器学习的方法应用在图像去雾霾中。相对于只用一张图像进行处理的传统方法,他们通过大量的雾霾图像训练出一个模型,来反映雾霾特征与传输图之间的关系。首先,选取暗通道、对比度、饱和度(Saturation)和色度(Hue)多种特征,其中暗通道、对比度和饱和度这3种根据掩模大小的不同选取不同尺度的特征;随后,通过随机定义传输图的方式为图像添加一定量的雾霾,再将合成图像分割成 5×5 的图像块,通过随机森林来建立这些小的图像块反映出的雾霾特征与传输图的关系,以获得一个学习好的模型,对测试图像进行去雾霾处理。其方法的框架如图 14 所示。

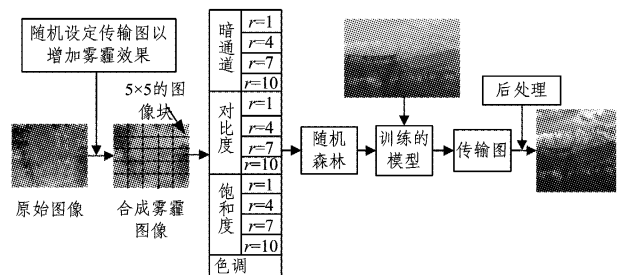


图 14 基于学习方法的去雾霾算法框架
其复原结果如图 15 所示。

图 15 Tang 等^[50]的复原结果

3 图像去雾霾的客观评价方法

在很长一段时间,图像去雾霾的结果只能依靠主观评价,即通过对复原结果的主观感受来衡量去雾霾的效果。这样的方法虽然简单直观,但是由于每个人对图像质量的评价标准有所差异,因此无法完全保证评价的公正性;同时,去雾霾问题的复杂性又导致简单的图像质量评价指标(如峰值信噪比等)不能很好地反映出复原效果。因此,现在尚无一个公认的客观评价指标用于去雾霾图像的质量评价。下面介绍几种在国内外的研究中常用的评价方法。

目前应用最为广泛的是 Hautière 和 Tarel^[48]提出的评价指标。该指标由 3 个具体参数组成:可见边数量之比 e ,正则化的可见边梯度均值 \bar{r} 和全黑/全白像素百分比 σ 。三者分别定义为:

$$e = \frac{n_r - n_0}{n_0} \quad (3)$$

其中, n_r 和 n_0 分别为复原图像和原始图像中可见边的数量。

$$\bar{r} = \exp\left[\frac{1}{n_r} \sum_{P_i \in \varphi_r} \log r_i\right] \quad (4)$$

其中, φ_r 为复原图像中的可见边集合; P_i 为属于可见边的像素点; r_i 是复原图像和原始图像在该像素点的梯度比,该梯度通过 Sobel 算子计算得到。

$$\sigma = \frac{n_s}{\dim_x \times \dim_y} \quad (5)$$

其中, n_s 为复原图像中全黑或全白像素的个数, \dim_x 和 \dim_y 指复原图像的宽和高。

如 Hautière 和 Tarel 所述,在理论上,复原效果越好应该对应更高的 e , \bar{r} 和更低的 σ 值,因为前两个参数反映了复原图像中视觉效果提升的部分,而最后一个则反映了由于复原而被过度处理的像素个数。然而实际上,3 个参数并不能达到统一,高的 e 值并不能对应高的 \bar{r} 值和低的 σ 值,且有的时候较好的指标数据在视觉效果上并不甚佳,这是因为复原图像中可见边并不完全来自远景处被雾霾遮蔽的区域,若近景处存在过处理,同样会导致可见边增加。

对此,郭瑶等人^[49]则提出了两种客观评价方法。一种是基于合成图像,首先利用 3ds max 等软件生成合成图像,然后利用 Z-depth 组件来设置光路图,以此得到不同雾霾程度的图像。对于这些图像,无雾霾影响的标准图是已知的,因此可以正确评价复原的结果。然而这种方法需要具备合成参考图像,而这一般是不易获得的,因此郭瑶等又从小人眼感知的角度出发提出了一种 CNC(Contrast-Naturalness-Colorfulness)综合评价体系。该体系同样通过 3 个参数构建而成:对比度增强指标 e' ,色彩自然度指标(Color Natural Index,CNI)和色彩丰富度评价指标(Color Colorfulness Index,CCI)。其中:

$$e'(x,y) = \frac{n(x)}{n(y)} \quad (6)$$

x 和 y 分别表示原始图像和复原图像, $n(\cdot)$ 表示该图像中可见边的数目。而 CNI 和 CCI 则来自文献^[50]。最终将 3 个指标按照如下方式进行综合,得到 CNC 评价:

$$CNC(x,y) = e'(x,y)^{\frac{1}{n_1}} \cdot CNI(y) + CCI(y)^{\frac{1}{n_2}} \cdot CNI(y) \quad (7)$$

其中, n_1 和 n_2 为大于或等于 1 的调节参数,用于减弱 e' 和 CCI 的变化来达到最符合人眼视觉的评价效果。

结束语 目前,图像去雾霾问题已经引起了学者的广泛关注,大量从不同角度出发的去雾霾算法得到了广泛的应用。这些算法大致可分为基于图像增强和基于物理模型两大类。其中,基于图像增强的方法大多只从图像本身考虑,通过直方图均衡化、Retinex 和小波处理等方法提升图像的对比度等视觉效果,这种方法由于本身并未考虑雾霾导致的降质过程,因此在恢复的同时往往容易造成过度处理的问题。

后来,研究者们发现了 McCartney 所提出的大气散射模型在解决这个问题上所表现出的巨大潜力,因此开始通过反演该物理模型来求解无雾霾图像。由于通过该模型求解无雾霾图像的过程中未知参数多于已知参数,因此是一个病态问题。研究人员通过各种方法来提供更加充足的信息,以提升复原图像的视觉效果。一些研究者通过建立三维模型或是借助用户输入的信息辅助求解,而另一些研究者则通过多幅图像或者特殊的成像设备(如添加偏振片或 RGBN 相机)获得更多信息。然而这些方法由于需要额外的设备或者信息,并不易于实际应用,因此其使用范围受到了严重限制。近几年,单幅图像去雾霾的思路得到了研究者的普遍认可。以 He 等人的暗通道为代表的先验理论得到了学界的普遍认可,使得单幅图像去雾霾问题的研究取得了重大突破。与此同时,基于融合、基于机器学习等方法也在不断发展,为单幅图像去雾霾开拓了更多新的思路。

相比去雾霾算法的发展,其客观评价体系的发展则并不那么迅速。虽然研究者们提出了多种指标来衡量去雾霾结果,但是由于算法本身仍然需要基于图像本身的某些数据,并不能完全与人眼主观感受保持一致,因此这些评价方法虽然在一定程度上能够反映去雾霾算法的效果,但距区分各类算法的优劣仍存在一定距离。

在图像去雾霾领域,未来可以从以下几个方向进行考虑:

(1)提升去雾霾方法的质量。目前的去雾霾方法,大多不能很好地处理浓重雾霾的情况。对于被雾霾覆盖较为严重的区域,要么不能复原其信息,要么复原结果很不自然,人工痕迹明显。因此,对于浓重雾霾去除的问题,仍需要更深入的研究。

(2)提升去雾霾方法的效率。目前很多去雾霾算法的时间复杂度仍然较高,但许多真实的应用,如视频监控、卫星探测等,都要求算法具备较高的实时性。因此,需要考虑降低算法的时间消耗。GPU 加速是一个很好的解决思路,未来可通过联合 CUDA 编程,通过 GPU 提升图像的处理速度,以满足实时性的需求。

(3)与深度学习的结合。Tang 等人基于机器学习的方法为解决去雾霾问题开启了一扇新的大门,而考虑深度学习在

图像处理应用中所具备的巨大优势,未来可将这一技术引入图像去雾霾领域中,将之前的雾霾图像更好地加以利用,更好地找出雾霾图像中的特征,为具体的雾霾图像复原提供更多支持。

参 考 文 献

- [1] ZHANG J P, ZHANG W. Improved algorithm of image defogging based on inversed limited contrast and adaptive histogram equalization[J]. *Internet of Things Technologies*, 2015, 5(2): 10-12. (in Chinese)
张久鹏, 张伟. 基于反转的限制对比度自适应直方图均衡图像去雾改进算法[J]. *物联网技术*, 2015, 5(2): 10-12.
- [2] CAO J L, LV H B, LI G Z. Histogram equalization algorithm based on adaptive local gray level modification[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2004, 33(5): 513-515. (in Chinese)
曹聚亮, 吕海宝, 李冠章. 基于自适应局部灰度修正的直方图均衡算法[J]. *红外与激光工程*, 2004, 33(5): 513-515.
- [3] KIM J Y, KIM L S, HWANG S H. An advanced contrast enhancement using partially overlapped sub-block histogram equalization [J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 2001, 11(4): 475-484.
- [4] AI M J, DAI L Z, CAO Q H. A self-adaptation image enhancement method for fog elimination in foggy environment[J]. *Computer Simulation*, 2009, 26(7): 244-247. (in Chinese)
艾明晶, 戴隆忠, 曹庆华. 雾天环境下自适应图像增强去雾方法研究[J]. *计算机仿真*, 2009, 26(7): 244-247.
- [5] ZHU P, ZHU H, QIAN X M, et al. An Image Clearness Method for Fog[J]. *Journal of Image and Graphics*, 2004, 9(1): 124-128. (in Chinese)
祝培, 朱虹, 钱学明, 等. 一种有雾天气图像景物影像的清晰化方法[J]. *中国图象图形学报*, 2004, 9(1): 124-128.
- [6] JOBSON D J, RAHMAN Z, WOODSELL G A. Properties and performance of a center/surround retinex [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 1997, 6(3): 451-462.
- [7] ZHANG S N, WU Y D, ZHANG H Y, et al. Haze image enhancement method based on improved single-scale Retinex [J]. *Laser & Infrared*, 2013, 43(6): 698-702. (in Chinese)
张赛楠, 吴亚东, 张红英, 等. 改进的单尺度 Retinex 雾天图像增强算法[J]. *激光与红外*, 2013, 43(6): 698-702.
- [8] HUANG L H. Fog-degraded image enhancement based on single-scale Retinex [J]. *Journal of Applied Optics*, 2010, 31(5): 728-733. (in Chinese)
黄黎红. 一种基于单尺度 Retinex 的雾天降质图像增强新算法[J]. *应用光学*, 2010, 31(5): 728-733.
- [9] RAHMAN Z, JOBSON D J, WOODSELL G A. Multi-scale retinex for color image enhancement [C] // *Proceedings of the IEEE International Conference on Image Processing*. Piscataway, NJ: IEEE Signal Processing Society, 1996: 1003-1006.
- [10] ZHAO X X, WANG R L. Improved Multi-scale Retinex Algorithm and Its Application [J]. *Computer Engineering*, 2011, 37(6): 209-211. (in Chinese)
赵晓霞, 王汝琳. 改进的多尺度 Retinex 算法及其应用[J]. *计算机工程*, 2011, 37(6): 209-211.
- [11] RUI Y B, LI P, SUN J T. Method of removing fog effect from images [J]. *Journal of Computer Applications*, 2006, 26(1): 154-156. (in Chinese)
芮义斌, 李鹏, 孙锦涛. 一种图像去薄雾方法[J]. *计算机应用*, 2006, 26(1): 154-156.
- [12] LI J X, YU X L. Enhance algorithm for fog images based on improved multi-scale retinex [J]. *Computer Science*, 2013, 40(3): 299-301. (in Chinese)
李菊霞, 余雪丽. 雾天条件下的多尺度 Retinex 图像增强算法[J]. *计算机科学*, 2013, 40(3): 299-301.
- [13] WANG M, ZHOU S, HUANG F, et al. The study of color image defogging based on wavelet transform and single scale retinex [C] // *Proc. SPIE 8194, International Symposium on Photoelectronic Detection and Imaging 2011; Advances in Imaging Detectors and Applications*. Bellingham, WA: SPIE, 2011: 81940F.
- [14] CAO Y M, ZHANG Y S. Wavelet-based retinex algorithm for image defogging [J]. *Journal of Jiangsu University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2014, 28(1): 50-55. (in Chinese)
曹永妹, 张尤赛. 图像去雾的小波域 Retinex 算法[J]. *江苏科技大学学报(自然科学版)*, 2014, 28(1): 50-55.
- [15] MCCARTNEY E J. *Optics of the atmosphere: scattering by molecules and particles [M]*. New York: John Wiley and Sons, Inc., 1976.
- [16] NARASIMHAN S G, NAYAR S K. Vision and the atmosphere [J]. *International Journal of Computer Vision*, 2002, 48(3): 233-254.
- [17] KOSCHMIEDER V H. *Theorie der horizontalen Sichtweite, Kontrast und Sichtweite [M]*. Frankfurt a. M: Keim & Nemnich, 1925.
- [18] KOPF J, NEUBERT B, CHEN B, et al. Deep photo: Model-based photograph enhancement and viewing [J]. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 2008, 27(5): 1-10.
- [19] NARASIMHAN S G, NAYAR S K. Interactive (de) weathering of an image using physical models [C] // *IEEE Workshop on Color and Photometric Methods in Computer Vision (ICCV)*. Washington DC: IEEE Computer Society, 2003.
- [20] CHEN G, WANG T, ZHOU H Q. A novel physics - based method for restoration of foggy day images [J]. *Journal of Image and Graphics*, 2008, 13(5): 888-893. (in Chinese)
陈功, 王唐, 周荷琴. 基于物理模型的雾天图像复原新方法[J]. *中国图象图形学报*, 2008, 13(5): 888-893.
- [21] SCHECHNER Y Y, NARASIMHAN S G, NAYAR S K. Polarization-based vision through haze [J]. *Applied Optics*, 2003, 42(3): 511-525.
- [22] SHWARTZ S, NAMER E, SCHECHNER Y Y. Blind haze separation [C] // *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. Washington DC: IEEE Computer Society, 2006: 1894-1991.
- [23] FENG C, ZHOU S, ZHANG X, et al. Near-infrared guided color image dehazing [C] // *Proceedings of the IEEE International Conference on Image Processing*. Piscataway, NJ: IEEE Signal Processing Society, 2013: 2363-2367.
- [24] TAN R T, PETERSSON N, PETERSSON L. Visibility

- enhancement for roads with foggy or hazy scenes[C]//Proceedings of the IEEE Intelligent Vehicles Symposium, IEEE Intelligent Transportation Systems Society, 2007:19-24.
- [25] TAN R T. Visibility in bad weather from a single image[C]//Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Washington DC: IEEE Computer Society, 2008:1-8.
- [26] FATTAL R. Single image dehazing[J]. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 2008, 27(3):1-9.
- [27] TAREL J P, HAUTIERE N. Fast visibility restoration from a single color or gray level image[C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision, Washington DC: IEEE Computer Society, 2009:2201-2208.
- [28] HE K, SUN J, TANG X. Single image haze removal using dark channel prior [C] // Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Washington DC: IEEE Computer Society, 2009:1956-1963.
- [29] HE K, SUN J, TANG X. Guided image filtering[C]//Proceedings of the European Conference on Computer Vision, Berlin Heidelberg: Springer, 2010:1-14.
- [30] KRATZ L, NISHINO K. Factorizing scene albedo and depth from a single foggy image[C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision, Washington DC: IEEE Computer Society, 2009:1701-1708.
- [31] MENG G, WANG Y, DUAN J, et al. Efficient image dehazing with boundary constraint and contextual regularization [C] // Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision, Washington DC: IEEE Computer Society, 2013:617-624.
- [32] SULAMI M, GLATZER I, FATTAL R, et al. Automatic recovery of the atmospheric light in hazy images[C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Computational Photography, Washington DC: IEEE Computer Society, 2014:1-11.
- [33] YU J, LI D P, LIAO Q M. Physics-based Fast Single Image Fog Removal[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2011, 37(2):143-149. (in Chinese)
禹晶, 李大鹏, 廖庆敏. 基于物理模型的快速单幅图像去雾方法[J]. *自动化学报*, 2011, 37(2):143-149.
- [34] GIBSON K B, VO D T, NGUYEN T Q. An investigation of dehazing effects on image and video coding [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2012, 21(2):662-673.
- [35] FANG S, ZHAN J, CAO Y, et al. Improved single image dehazing using segmentation[C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Image Processing, Piscataway, NJ: IEEE Signal Processing Society, 2010:3589-3592.
- [36] ZHU Y, LIU J, HAO Y. An single image dehazing algorithm using sky detection and segmentation[C]//Proceedings of the IEEE International Congress on Image and Signal Processing, Piscataway, NJ: IEEE, 2014:248-252.
- [37] PARK H, PARK D, HAN D K, et al. Single image haze removal using novel estimation of atmospheric light and transmission[C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Image Processing, Piscataway, NJ: IEEE, 2014:4502-4506.
- [38] CHEN L, GUO Y K, LI J P. Effectiveness algorithm to inhibit halo effect based on sigmoid function [J]. *Computer Science*, 2015, 42(11):112-117. (in Chinese)
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.
- [39] GUO P, CAI Z X, XIE B. Video defogging algorithm based on fog theory[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2011, 39(9):2019-2025. (in Chinese)
郭璠, 蔡自兴, 谢斌. 基于雾气理论的视频去雾算法[J]. *电子学报*, 2011, 39(9):2019-2025.
- [40] PANG C Y, JI X Q, SUN L N, et al. An improved method of image fast defogging [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, 42(7):872-877. (in Chinese)
庞春颖, 嵇晓强, 孙丽娜, 等. 一种改进的图像快速去雾新方法[J]. *光子学报*, 2013, 42(7):872-877.
- [41] SUN K, WANG B, ZHOU Z Q, et al. Realtime image haze removal using bilateral filter [J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2011, 31(7):810-813. (in Chinese)
孙抗, 汪渤, 周志强, 等. 基于双边滤波的实时图像去雾技术研究[J]. *北京理工大学学报*, 2011, 31(7):810-813.
- [42] LIU N, CHENG Y M, ZHAO Y Q. An image dehazing method based on weighted dark channel prior[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, 41(3):320-325. (in Chinese)
刘楠, 程咏梅, 赵永强. 基于加权暗通道的图像去雾方法[J]. *光子学报*, 2012, 41(3):320-325.
- [43] CIE 1931. CIE 1931 2° Standard Observer[S]. Cambridge: Cambridge University Press, 1932.
- [44] LI Y, MIAO Q, SONG J, et al. Single image haze removal based on haze physical characteristics and adaptive sky region detection [J]. *Neurocomputing*, 2016, 182(3):221-234.
- [45] ANCUTI C O, ANCUTI C. Single image dehazing by multi-scale fusion[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2013, 22(8):3271-3282.
- [46] GUO P, TANG J, CAI Z X. Single image defogging based on fusion strategy[J]. *Journal on Communications*, 2014, 35(7):199-207. (in Chinese)
郭璠, 唐瑾, 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.
- [47] TANG K, YANG J, WANG J. Investigating haze-relevant features in a learning framework for image dehazing[C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Washington DC: IEEE Computer Society, 2014:2995-3002.
- [48] HAUTIERE N, TAREL J P, AUBERT D, et al. Blind contrast enhancement assessment by gradient ratioing at visible edges [J]. *Image Analysis & Stereology Journal*, 2008, 27(2):87-95.
- [49] GUO P, CAI Z X. Objective Assessment Method for the Clearness Effect of Image Defogging Algorithm [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2012, 38(9):1410-1419. (in Chinese)
郭璠, 蔡自兴. 图像去雾算法清晰化效果客观评价方法[J]. *自动化学报*, 2012, 38(9):1410-1419.
- [50] HUANG K Q, WANG Q, WU Z Y. Natural color image enhancement and evaluation algorithm based on human visual system[J]. *Computer Vision and Image Understanding*, 2006, 103(1):52-63.