

单幅图像去雾方法研究

毕笃彦¹, 葛渊², 李权合¹, 任志河³, 南栋¹, 陈剑鹏¹

(1. 空军工程大学航空航天工程学院, 陕西西安, 710038;

2. 西北有色金属研究院, 金属材料多孔材料国家重点实验室, 陕西西安, 710016;

3. 空军后勤部司令部, 北京, 100720)

摘要 介绍了单幅图像去雾方法的研究现状, 分析了基于增强方法和基于复原方法的一些经典图像去雾算法, 指出了各种算法的优缺点。综合评价得出基于复原的图像去雾方法优于基于增强的图像去雾方法。针对现有的基于图像复原去雾方法提出了仍需要深入研究的问题, 并从建立全面物理模型、探索模型求解的先验知识、设计基于人眼视觉机制的模型求解方法和图像去雾质量评价等几个方面分析如何突破图像去雾的关键技术。最后, 对现有技术的发展趋势进行了分析, 指出了去雾技术的研究方向。

关键词 雾霾; 大气退化; 图像去雾; 图像恢复; 图像增强; 人眼视觉

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2013.06.012

中图分类号 TP391.41 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2013)06-0046-08

A Research on Defogging Methods with Single Image

BI Du-yan¹, GE Yuan², LI Quan-he¹, REN Zhi-he³, NAN Dong¹, CHEN Jian-peng¹

(1. Aeronautics and Astronautics Engineering College, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China; 2. Northwest Institute for Nonferrous Metal Research, Xi'an 710016, China; 3. Headquarters of PLA Air force Logistics Department, Beijing 100720, China)

Abstract: Current situation of single image defogging method are introduced, some classic algorithms based on image enhancement and image restoration are analyzed in detail, and advantages and disadvantages are listed in this paper. Comprehensive evaluation results show that the image restoration method is superior to the image enhancement method in the aspect of defogging. Aimed at the existing image restoration defogging method, thorough investigation and study are needed, and some problems about how to break through key technologies in defogging are analyzed from the establishment of a comprehensive physical model, the exploration of a prior knowledge of the model solution, the design of model solution methods based on human visual mechanism, and the evaluation of image defogging quality and some other aspects, etc.. Finally, the development trend of the existing technology is analyzed, and the orientation of studying defogging technology is given.

Key words: fog and haze; atmospheric degradation; image defogging; image restoration; image enhancement; human vision

收稿日期: 2013-11-27

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61372167; 61379104; 61203268; 61202339)

作者简介: 毕笃彦(1962—), 男, 陕西扶风人, 教授, 博士生导师, 主要从事图像处理、模式识别研究。

E-mail: biduyan@126.com

近年来,随着雾霾天气的增多,可见光系统的成像质量越来越多的受到人们关注。在雾霾等天气条件下,大气中的分子,水汽及悬浮的大量颗粒组成的气溶胶对光线形成严重的吸收、散射和反射作用,造成大气能见度降低,加上大气湍流的影响,致使可见光成像系统的图像质量降低^[1-2],严重影响了复杂气象环境下可见光成像系统的使用。如道路安全监控、汽车安全驾驶、光学武器作战、敌我战场监视等。特别是近年来国内各大城市出现的严重雾霾天气,导致城市交通瘫痪、航班延误取消,严重影响了人们的日常生活、工业生产以及军事侦察和作战,从而引起了各国政府的重点关注。

从环保角度出发,各国各地政府普遍制定政策法规,鼓励和推广新技术,进行节能限污,实现绿色生产和生活。从技术角度出发,分析雾霾成因,研究透雾技术,提高雾霾气象条件下的能见度,已成为多个学科的研究热点。目前透雾技术的研究主要集中在以下几个方面:光线在大气中的透过率研究,依据大气窗口,设计适用于雾霾天气的中、长波段光学镜头和成像传感器;适用于雾霾图像处理的各种数字图像增强方法研究;适用于图像增强显示的宽动态显示技术研究等。由于篇幅限制,本文仅针对单幅图像去雾方法这种数字图像增强技术进行阐述。

图像去雾的研究工作始于 20 世纪 50 年代,主要是美国学者针对地球资源卫星图片云雾退化问题而展开的。经过建模和分析,发展了灰度变换,直方图均衡,同态滤波、伪彩色图像增强等传统图像增强方法,改善了雾霾退化对图像质量的影响。而从 20 世纪 70 年代开始,基于视觉恒常性理论,基于大气传输模型,基于宽动态显示技术的新概念的图像去雾技术不断被提出和研究,并且随着实际应用检验在 80 年代取得了较大的进展。

该领域国外一些知名研究机构和成果有: NASA 下属兰利研究中心可视信息处理实验室(NASA Langley Research Center Visual Information Processing Lab)于 20 世纪 80 年代将 Retinex 算法^[3-10]引入到各种图像增强中,尤其在宇航图像增强和航拍图像去雾方面获得了非常好的处理效果,并逐步将重点转向飞行等实际系统应用之中。如 NASA 研发的飞行视觉伺服系统(Visual Servo for Aviation)针对飞行中出现雾霭、烟尘等恶劣天气,为飞行人员提供实时自适应图像增强,同时开发了可进行多种应用的商业软件 Truview Photoflair; 哥伦比亚大学的计算机视觉实验室研究如何利用不同天气条件下同一场景的多幅图像来恢复清晰图像,并建立了不同天气条件下同一场景的 WILD (Weather and Illumination Database)数据库;以色

列的联合成像实验室研究基于偏振滤波的方法^[11-12],该方法对大气成像和水中成像均适用;曼彻斯特大学电气和电子工程学院的传感、图像和信号处理组在图像对比度恢复方面进行了长期的研究,并且英国 Dmist 公司在此研究基础之上开发了商业产品 ClearVue; Z 微系统公司(Z Microsystems)在“AUVSI2010 无人机展”中展示了一种实时图像增强和传输系统(Any-Image-Anywhere, AIA),AIA 尤其可以显示因能见度低或大气干扰而弱化的图像细节,同时有助于查看宽广地形中的隐藏目标。在这方面的国内研究也取得了一定成绩。国内的研究机构和成果有:微软亚洲研究院与香港中文大学信息工程系的多媒体实验室合作,研究基于暗通道先验的单幅图像去雾方法^[12],成功将暗通道先验用于估计雾的浓度和场景的深度图,成果较为显著并获得了 2009 年 CVPR(Computer Vision and Pattern Recognition, CVPR)的 Best Paper;清华大学禹晶^[13]等人在暗原色先验的基础上,将双边滤波引入到大气传递图的细化上,从而避免了使用抠图方法细化大气传递图带来的巨大时间开销;中国科学院安徽光学精密机械研究所的方帅^[14],中南大学信息科学与工程学院的郭璠^[15],等人分别开展了基于物理模型的图像去雾方法研究,在提升图像对比度、细节信息以及算法实时性上取得了很大成效。其它研究所和高校的相关研究工作尚处于进一步发展中。

1 现有方法

目前,单幅图像去雾技术主要包括解释色彩恒常性理论的 ACE 算法^[16],基于 Retinex 模型的 MSRCR 方法^[17-18]和变分法^[19-20],以及基于物理模型的 Fattal^[21]、Tan^[22]、何凯明^[23]、Tarel^[24]、禹晶^[25]、郭璠^[15]、方帅^[14]等人的算法。现有去雾方法可分为:基于图像增强的方法和基于图像复原的方法两类。

1.1 基于图像增强的方法

基于图像增强的方法不要求解大气退化的物理模型,而是从人类视觉感受出发,直接增强图像对比度、修正图像色彩以改善图像质量,提升图像可视效果。这类方法根据是否恢复场景的色彩信息,可以分为完备图像增强算法(可以有效恢复场景色彩信息)以及非完备图像增强算法(不能恢复场景色彩信息)。

1.1.1 完备图像增强算法

此类方法中最具代表性的是基于视觉恒常性理论的 Retinex 方法。Retinex 理论认为在视觉信息的传导过程中人类的视觉系统对信息进行了某种处

理,去除了光源强度和照射不均匀等一系列不确定的因素,而只保留了反映物体本质特征的信息,如反射系数等。当这些描述物体本质特征的相关信息传递到大脑皮层后,经过更为复杂的信息处理,才最终形成人的视觉。Retinex 理论模型为:

$$S(x, y) = R(x, y) \times L(x, y) \quad (1)$$

式中: S 为已知图像; R 为反射图像; L 为亮度图像。Retinex 算法就是要从已知图像中估计亮度图像,然后将其去除得到反射图像,从而在不考虑照度发生变化的情况下还能还原出清晰的图像。所以, Retinex 图像增强算法是一种建立在科学实验和科学分析基础上的图像增强理论。基于色彩恒常性理论的 Retinex 算法^[26-27],将图像视为光照图像和反射图像的乘积,通过估计光照图像,再从原图像中将其消除,获得可视效果良好的反射图像,该方法可以同时实现全局和局部对比度调整、高动态范围压缩(HDR)^[28-29]和色彩恒常性。从 Retinex 理论的提出到现在,基于 Retinex 理论的图像增强算法已经经历了 3 个阶段,每个时期的代表算法分别为:第 1, Land, McCann 提出的基于路径的方法;第 2, Jobson 等 90 年代提出的中心环绕法;第 3, 2003 年 Kimmel 在变分框架下的 Retinex 方法,其在保证动态范围压缩的前提下,将各种 Retinex 方法统一为变分形式。

另外,此类方法还包括:基于闵科夫斯基范数的灰色调算法例如 WP(White-Point)算法^[30-31]和 GW(Gray-World)^[32]算法;色调映射方法、概率统计方法和机器学习方法,这些都是基于学习的方法,通过训练学习获取景物表面反射或光照色彩分布的先验知识来进行光照色彩的估计;基于人眼视觉系统的中心/领域侧抑制机理提出的 ACE 算法^[33-34],该算法通过综合 WP 和 GW 色彩校正机制,在增强图像全局和局部对比度的同时,可以获取非常好的场景色彩恢复结果;另外基于仿生学的彩色图像增强算法也取得了良好的增强效果^[35]。

1.1.2 非完备图像增强算法

此类方法中最具代表性的方法是直方图均衡化方法^[36-37]和同态滤波方法。直方图均衡化是非常典型的空域增强方法,它可以大大改善图像灰度分布的动态范围,增加图像的整体对比度,使人眼获得更好的观看效果。该算法因其简洁高效而得到了广泛的应用。

直方图均衡化的基本思想是使增强后图像的灰度统计直方图呈现为均匀分布,从而改善整幅图像灰度分布的动态范围。它所采用的方法是利用累积分布函数作为图像灰度值的变换曲线。用 s 表示原图像中像素的灰度值, t 表示第 k 级灰度值, t 表示

增强图像中像素的灰度值, t_k 表示第 k 级,并对 s_k 和 t_k 作归一化处理,则直方图均衡化可表示为:

$$t_k = EH(s_k) = \sum_{i=0}^k \frac{n_i}{n} \sum_{i=0}^k p_{s_k}(s_i),$$

$$0 \leq s_k, t_k \leq 1, k=0, 1, \dots, L-1 \quad (2)$$

式中: L 是图像的灰度级个数; n_i 是图像中具有灰度值 s_i 的像素的个数; n 是图像的像素总数; EH 代表增强操作。 p_{s_k} 即为灰度统计直方图。可以证明累积分部函数能将 s 的灰度分布近似转换为 t 的均匀分布,之所以用“近似”两字是因为式(2)是由连续函数直接导出,故在数字化的量化时会带来误差。近年来,章怡、吴成茂等人先后提出了很多改进的直方图均衡化方法^[38-40],在图像增强领域取得了较好的效果。

将一幅图像 $f(x, y)$ 描述成反射图像 $r(x, y)$ 和光照图像 $i(x, y)$ 的乘积,根据此模型可以通过图 1 描述的过程将两者分别进行滤波。

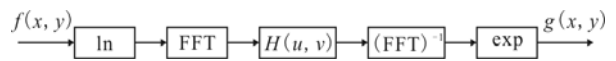


图 1 同态滤波流程图

Fig. 1 Homomorphic filtering flow chart

图中频域增强函数 $H(u, v)$ 就是所谓的同态滤波函数,它可以分别作用在照度分量和反射分量上。同态滤波可以同时图像亮度的动态范围进行压缩并增强图像的对比度,但当图像中的亮度存在较大差异时,同态滤波往往会出现很多假象。

另外,此类算法还包括:灰度映射方法、非锐化掩模方法(USM)^[41]、伽玛校正方法^[42-47]等等,非完备图像增强方法可以有效提升图像对比度,但不能有效恢复场景色彩信息。

基于图像增强的方法从人眼主观视觉效果出发,对图像本身的像素或邻域进行处理,计算相对简单,处理景深较为平均且雾霾分布均匀的退化图像时可以取得不错的效果,但由于缺乏对景深信息以及雾霾浓度的估计,对存在不同景深的图像以及雾霾浓度不均的图像处理效果不好,往往会产生不可预测的失真,尤其不能有效改善景深较大处场景的对比度和色彩。

2.2 基于图像复原的方法

基于复原的方法从图像退化的物理模型出发,通过分析、求解图像降质过程的逆过程,获得各降质环节的相关参数,从而恢复出尽可能逼真的清晰图像。这类方法认为在雾、霾天气条件下,大气中悬浮的大量粒子对光线具有较强的散射作用:一方面,物体表面的反射光由于大气粒子的散射而发生衰减与前向散射^[48],衰减造成入射到成像系统的光线减弱,从而成像亮度降低,前向散射导致图像模糊、分辨率降低;另一方面,自然光由于大气粒子的散射作

用进入成像系统对物体表面反射光造成干扰,导致图像的饱和度、对比度的降低以及色彩的偏差。Narasimhan 和 Nayar 基于 McCartney 的衰减模型和环境光模型,提出了单色大气散射模型(Monochromatic Atmospheric Scattering Model, MASM)^[49],用以描述雾霾天气条件下的退化过程,近年来几乎所有的基于图像复原方法的图像去雾技术都是基于该模型展开的研究,其数学表达为:

$$I(x) = LR(x)e^{-\beta I(x)} + L(1 - e^{-\beta I(x)}) \quad (3)$$

式中: L 为大气光照; β 为大气粒子散射系数; R 和 d 分别为空间坐标 x 处的场景反射率和景深。常设 $t(x) = e^{-\beta I(x)}$,将 $t(x)$ 称作大气传递图。其中 $LR(x)e^{-\beta I(x)}$ 为直接衰减项,表示物体表面反射光经大气粒子散射作用之后进入成像系统的部分,它随光线传播距离的增加成指数衰减, $L(1 - e^{-\beta I(x)})$ 为环境光干扰项,它随着光线传播距离的增大而增强。求解该模型估算出参数 L , β 和 d ,即可从中反解出场景的反射率,从而得到视觉清晰的图像。由于模型中存在 L , β 和 d 多个未知参数,因此这是一个病态反问题,病态反问题在借助最优化工具进行求解时往往造成巨大的计算复杂度和时间复杂度,而且求解过程通常需要退化场景的先验知识或者需要做出假设条件或者弱化限制,所以算法的鲁棒性难以保证,不适合对未知环境下的退化图像进行处理。

此类方法中具有代表性的有 Fattal、Tan、何凯明等人的算法。图2为多种去雾方法的处理结果对比。其中 Fattal 的去雾算法基于2个假设,即图像场景反射率具有局部光滑属性,大气传递图和场景表面反射光局部统计无关,继而通过独立成分分析的方法估计常向量反射率。当输入图像的独立成分变化不显著或者色彩信息不足时将导致算法失效,对于景深较大的雾霾场景,其对比度及色彩必然急剧会下降,从而会导致算法失效,故而该方法去除景深较大处的雾霾效果较差;Tan 的方法基于去雾图像对比度显著增强的假设,通过在马尔科夫随机场框架下遍历环境光求得最优解,这种方法会在图像景深跃变处产生严重的光晕现象,导致去雾结果的视见度降低,而且在雾霾较浓的图像中场景反射图受到直接衰减项的降质影响占绝大部分比例,通过遍历环境光约束去雾结果的梯度最大,没有考虑直接衰减项的影响,因此不能有效去除大雾;何凯明的去雾方法基于暗通道先验的假设,在观察了5000余幅白天拍摄的无雾图像后,得出的一幅清晰的图像在一个小区域内(不包括天空区域)3个色彩通道的最小值趋于0的统计结果。然而当场景中存在大片的白色区域,且这些区域上没有阴影遮挡时,此假设失效,而且文中假设图像中的光照为全局常量,当

图像中存在阳光直射以及光照不均时,算法失效。算法中彩色图像的3个通道共用同一个大气传递图,然而对不同波段的可见光大气散射程度是不同的,其中蓝光的散射率最高,因此去雾结果会呈现蓝色并且模糊。

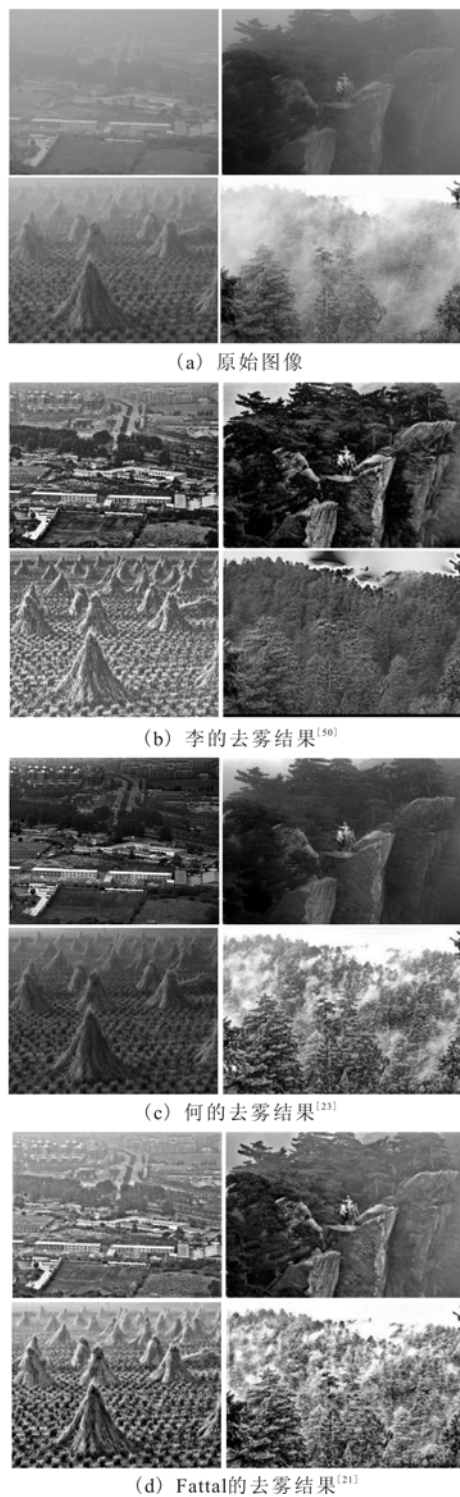


图2 多种去雾方法的处理结果

Fig. 2 The results of various defog method

总之,从当前国内外的研究成果来看,基于增强的方法和基于物理模型的方法各有利弊。基于图像增强的方法从主观视觉出发可有效提高图像对比

度,在色彩校正上模拟了人眼视觉系统对场景色彩的认知,增强后的色彩与基于物理模型的方法相比具有更好的可视性,且基于增强的方法有很多优秀的求解方法,能够实时增强图像,在去薄雾方面效果较好。但基于增强的方法有时会造成不可预测的失真,且增强复杂景深退化图像时效果不佳。基于物理模型的方法从雾霾退化的物理过程出发,分析构建雾霾退化的物理模型,通过优化求解能够去除雾霾而不损伤图像的质量,兼顾了多种景深图像的增强,但仍不能达到理想去雾结果。另外,基于物理模型的方法需要借助最优化工具求解,具有较大的时间开销。

2 需要进一步突破的关键技术

综合评价,基于复原的图像去雾方法较基于增强的图像去雾方法能够更好地恢复真实场景。同时,基于图像复原的去雾方法仍然面临以下问题有待于进一步深入研究:

1)单色大气散射模型(式(3))对大气光的简化,造成算法的自适应性不强,在平衡远景和近景的增强结果时牺牲了远景的可视性。单色大气模型在求解过程中,认为大气光为全局常量,事实上成像过程中的大气光包括场景的反射光、大气的散射光、太阳的直射光、背景的折射光等,并不是全局常量,如果将其设为全局常量,为了兼顾近景去雾效果,必然要降低全局常量的估值,这样就造成远景去雾效果减弱;

2)在雾霾天气往往伴随有较强的大气湍流退化,单色大气散射模型无法指导有效提升退化图像的清晰度,其中一个主要原因是该模型没有考虑同雾霾并存的其它大气退化要素——大气湍流,它对图像的退化直接导致图像模糊,而且随着景深的增加导致的模糊现象更加严重。

3)一些现有的模型求解过程所依赖的先验和假设鲁棒性较差。例如,何凯明利用无雾图像3个色彩通道的局部最小值趋于0的先验去估计雾霾浓度,Gbsion利用局部区域内3个色彩的分布呈椭圆分布的先验去估计雾霾浓度^[51],然而这种先验在雾霾浓度较大时不具有良好的区分度。

针对上述诸多问题,后续研究很有必要从以下几个方面突破图像去雾的关键技术:

1)研究更全面的图像雾霾退化模型。物理模型的构建和求解是基于物理模型的图像去雾方法的关键问题。当前,在计算机视觉和图像处理领域被广泛使用的雾霾退化模型就是式(1)所述的单色大气

散射模型,该模型存在诸多问题已在上节分析,虽然现阶段还存在其它可用于描述雾霾退化的模型,诸如双色大气散射模型^[52]、ATF模型^[53]和Retinex模型,但都无法准确描述雾霾退化现象。然而,一个能够准确描述雾霾退化现象的物理模型是有效消除雾霾、提升图像对比度、清晰度的基础。所以,有必要借鉴现代大气光学的研究成果^{[54]339-351},除考虑雾霾退化外,再引入复杂大气光、大气湍流等多种引起图像退化的要素,建立更为全面的物理模型。

2)探索模型求解所依赖的先验知识。图像去雾问题是求解一个方程多个未知数的病态反问题,在模型的优化求解过程中需要用到很多关于图像特征、模型中各变量间关系以及求解目标等内容的先验和假设,而现有的一些先验知识不适用大雾、阴霾天气。因此,为了准确求解场景反照率,需要开展模型求解过程中所需先验知识的研究。内容涉及对清晰场景先验和雾霾退化先验的研究。针对清晰图像先验的研究,可以在现有的统计先验基础之上进行完善,同时以人眼视觉的色彩恒常性、亮度恒常性以及对比灵敏度为研究对象,探索人眼对清晰图像的认知先验。针对雾霾退化图像先验的研究,可以分别研究混浊介质和湍流介质影响成像的效果,研究光强和光场的变化反映在图像特征上的变化。最后,针对各类场景,包括不同景深、不同雾霾浓度、不同光照、不同背景,发掘普适性好的先验知识,能够有效约束图像求解过程,辅助精确估计场景反照率。

3)将基于增强的方法融入到物理模型求解中,设计基于人眼视觉机制的模型求解方法。为了快速准确估计模型中的参数,需要研究雾霾退化模型的高效求解方法。图像退化模型的求解属于一个方程多个未知数的病态反问题,目前此类问题的求解多借助于最优化工具,诸如Tan在求解过程中用到了graph cut方法,Fattal在求解过程中应用了ICA方法,等。但这些最优化求解方法具有极高的复杂度,不利于去雾算法的实时性,而且此类方法求解结果不一定能够满足人眼视觉的认知特性。基于增强的方法中有很多模拟了人眼视觉机制,能够快速准确的估计图像亮度,恢复图像真实色彩等,因此,有必要更为深入地探索人眼视觉获取、增强、理解信息的过程,将人眼视觉认知机制对应到模型求解过程,针对视觉机制建模,并寻求快速优化求解方法。

4)基于特征认知的无参考图像去雾质量评价方法。为了有效评价退化图像的去雾效果,比较去雾算法的优劣,指导去雾方法的研究,并为设计闭环的图像去雾方法奠定研究基础,有必要开展去雾质量评价方法的研究。图像质量评价方法的研究已有多

年的历史,现阶段已提出许多成熟的方法^[55],按照是否依赖于人眼主观视觉可分为主观质量评价方法和客观质量评价方法,所有客观质量评价方法都把主观评价作为拟合的目标。当前,针对图像去雾质量评价的研究尚处于进一步发展当中,评价指标多集中在图像清晰度、对比度、色度和结构信息的测度上,没有统一的评价标准。基于特征认知的无参考图像去雾质量评价方法由于能够较好的拟合人眼视觉特性,将会是一个重要的研究方向,通过引入图像处理模型、统计模型、视觉信息模型和机器学习理论,可以得到更为准确地反映客观图像去雾质量的评价机制。

3 几点有意的探索

3.1 改进的大气退化模型

2013年中国武汉大学资源与环境科学学院的兰霞(Xia Lan,音译)等人在《EURASIP Journal on Advances in Signal Processing》上发表了题为“Single image haze removal considering sensor blur and noise”的论文^[56],将单色大气模型引入点扩展函数,描述光学传感器造成的图像模糊现象,同时,考虑真实成像过程引入了加性噪声,修改后的模型为:

$$I(x) = h(x) * [J(x)t(x) + A(1-t(x))] + n(x) \quad (3)$$

何仁杰(Renjie He,音译)等人在2013 IEEE 8th Conference on Industrial Electronics and Applications的会议论文集上发表了题为“Multiple Scattering Model based Single Image Dehazing”的论文^[57],将单色大气模型引入点扩展函数,描述多重散射造成的图像模糊现象,修改后的模型为:

$$I(x) = (J(x) * h) t(x) + A(1-t(x)) \quad (4)$$

兰和何等人已经意识到:想要有效去除图像模糊,提升图像对比度、清晰度,就要考虑更多的引起图像退化的要素,在模型改进方面他们走出了很重要的一步。

3.2 计算雾霾浓度的先验知识

对于计算雾霾浓度的先验知识来说,越直观越简单越好,何凯明等人提出的暗通道先验,凭借其简单有效的计算方式得到了业内学者的广泛认同,其计算表达式为:

$$DCP(I(x)) = \min_{y \in \Omega(x)} \{ \min_{c \in \{R,G,B\}} (I_c(y)) \} \quad (5)$$

通过该先验得到的雾霾浓度,由于需要进行领域操作,常会造成计算不够准确的现象,直接用于去雾除了会造成光晕现象外,还会导致色彩偏差,因此必须经过复杂的细化运算才能得到较为准确的雾霾浓度的估计,所以该先验变得不再简单。由于色彩

饱和度和暗通道先验具有很大的相关性,可以研究带约束的色彩饱和度估计雾霾的浓度,通过饱和度计算雾霾浓度具有很好的直观性。

$$S = 1 - 3 \times \frac{\min_{c \in \{R,G,B\}} (I_c)}{I_R + I_G + I_B} \quad (6)$$

上式为饱和度计算公式,式(6)右边第2项可视作细化操作后的暗通道估值,如果再加上图像色彩自然度、丰富度,图像纹理等约束,则有望有效区分图像中天空、白色目标以及水面区域。

3.3 人眼视觉机制在去雾中的应用

图像去雾本质上将就是实现图像对比度的提升、图像色彩的恢复以及亮度的调整。对人眼视觉系统的研究成果表明,诸多人眼视觉认知机制在图像去雾中具有重要的应用,例如人眼的视觉恒常性启发科研人员在任何光照、气象条件下,人眼感知的场景色彩是不变的,变化的只有色彩饱和度,因此在图像对比度提升过程需要保持3个颜色通道的相对大小关系;人眼视觉的感光适应性明确了视网膜上的锥状细胞在光线强的情况下工作,主要感受颜色和分辨细节,而杆状细胞在光线弱的情况下工作,主要感受亮度和运动,无颜色,对细节不敏感。因此,为使去雾结果更适宜人眼视觉,需将图像亮度调节到适宜锥细胞工作的亮度区间;人眼视觉的对比灵敏度特性说明相邻像素的差异性如果能被察觉,需满足 $\Delta I(x, y) / I_B \geq N_B$,其中 $\Delta I(x, y)$ 表示相邻像素 x 和 y 间亮度差异, I_B 为2个像素点所处区域的背景亮度, N_B 为同背景亮度有关的阈值。因此,图像对比度提升即为保持像素差值,降低背景亮度。综合几点人眼视觉机制,可将去雾过程概括为:在色彩恒常性的约束下提升图像对比度,然后校正图像亮度。

4 结语

本文概括性地介绍了图像去雾技术取得的研究成果,国内外的研究现状和发展趋势,针对该领域的几点关键技术提出了有针对性的研究内容,并指出了国内外学者近期所做的一些有意义的工作。为了实现雾霾退化图像真实场景的再现,将基于图像增强的方法融入到基于图像复原的方法当中,在求解物理模型时更多的考虑拟合人眼视觉机制,以期去雾结果能够具有更好的视觉愉悦性,将是未来该技术发展的大方向。

参考文献(References):

[1] 朱森良,钱徽.自然景物中大气退化模型的研究[J].计算机

- 助设计与图形学学报, 2001, 13(9):793-799.
- ZHU Miaoliang, QIAN Hui. Research on atmosphere degradation model of nature scene[J]. Journal of computer-aided design & computer graphics, 2001, 13(9): 793-799. (in Chinese)
- [2] 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.
- ZHU Pei, ZHU Hong, QIAN Xueming, et al. An image clearness method for fog[J]. Journal of image and graphics, 2004, 9(1):124-128. (in Chinese)
- [3] Provenzi E, De Carli L, Rizzi A, et al. Mathematical definition and analysis of the Retinex algorithm [J]. Journal of the optical society of America, 2005, 22(12):2613-2621.
- [4] Elad M, Kimmel R, Shaked D, et al. Reduced complexity Retinex algorithm via the variational approach [J]. Journal of visual communication and image representation, 2006, 14(4):369-388.
- [5] Meylan L, Susstrunl S. High dynamic range image rendering with a Retinex-based adaptive filter [J]. IEEE transactions on image processing, 2006, 15(9):2820-2830.
- [6] Liu Jiapeng, Zhao Yuning, Hu Fuqiao. A nonlinear image enhancement algorithm based on single scale Retinex [J]. Journal of Shanghai jiaotong university, 2007, 41(5): 685-688.
- [7] Choi D H, Jang I H, Kim M H, et al. Color image enhancement based on single-scale retinex with a JND-based nonlinear filter[C]//Proc IEEE int symp circuits and syst. New Orleans, USA; IEEE press, 2007:3948-3951.
- [8] Shaked D. Interpolation for nonlinear retinex type algorithms [C]//Proceedings of SPIE, the int society for optical engineering. Bellingham: SPIE, 2007:649312. 1-649312. 7.
- [9] 许欣, 陈强, 王平安, 等. 消除光晕现象的快速 Retinex 图像增强[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2008, 20(10): 1325-1331.
- XU Xin, CHEN Qiang, WANG Ping'an, et al. A fast halo-free image enhancement method based on Retinex[J]. Journal of computer-aided design & computer graphics, 2008, 20(10): 1325-1331. (in Chinese)
- [10] Rahman Zia-Ur, Jobson D J, Woodell G A. Multi-scale Retinex for color image enhancement[EB/OL]. (2009-12-15) [2013-11-27]. ftp://vipsun.larc.nasa.gov/pub/papers/icip96-multir.
- [11] Namer E, Schechner Y Y. Advanced visibility improvement based on polarization filtered images[C]//Polarization science and remote sensing II. San Diego, CA, USA:SPIE, 2005:1-10.
- [12] Schechner Y Y, Karpel N. Clear underwater vision [C]//Proceedings of IEEE conference on computer vision and pattern recognition (CVPR). Washington, DC, USA: IEEE computer society, 2004:1543-1563.
- [13] Yu Jing, Liao Qingmin. Fast Single Image For Removal Using Edge-Preserving Smoothing[C]//Proceedings of IEEE international conference on acoustics, speech, and single processing. [S. l.]:IEEE press, 2011: 1245-1248.
- [14] 方帅, 王勇, 曹洋, 等. 单幅雾天图像复原[J]. 电子学报, 2010, 38(10):2279-2284.
- FANG Shuai, WANG Yong, CAO Yang, et al. Restoration of image degraded by haze[J]. Acta electronica sinica, 2010, 38(10):2279-2284. (in Chinese)
- [15] 郭璠, 蔡自兴, 谢斌, 等. 单幅图像自动去雾新算法[J]. 中国图象图形学报, 2011, 16(4):516-521.
- GUO Fan, CAI Zixing, XIE Bin, et al. New algorithm of automatic haze removal for single image[J]. Journal of image and graphics, 2011, 16(4):516-521. (in Chinese)
- [16] Land E H. McCann J J. Lightness and Retinex theory [J]. Journal of the optical society of America, 1971, 61(1):1-11.
- [17] 程娅荔, 张也驰. 基于 MSR 的雾天图像清晰化算法研究[J]. 计算机仿真, 2012, 29(4):305-308.
- CHENG Yali, ZHANG Yechi. Research fog-degraded images clearness algorithm based on the MSR[J]. Computer simulation, 2012, 29(4):305-308. (in Chinese)
- [18] Brainard D, Wandell B. Analysis of the Retinex theory of color vision [J]. Journal of the optical society of America, 1986, 3(10):1651-1661.
- [19] Terzopoulos D. Image analysis using multigrid relaxation methods [J]. IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence, 1986, 8(2):129-139.
- [20] Kimmel R, Elad M, Shaked D, et al. A variational framework for Retinex [J]. Computer vision, 2003, 52(1):7-23.
- [21] Fattal R. Single image dehazing[J]. ACM transactions on graphics, 2008, 27(3): 1-9.
- [22] Tan R T. Visibility in bad weather from a single image[C]//Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition. Anchorage: IEEE press, 2008:1-8.
- [23] He K, Sun J, Tang X. Single image haze removal using dark channel prior [C]//Proceedings of IEEE computer society conference on computer vision and pattern recognition (CVPR). Miami, FL, USA:IEEE computer society, 2009: 1956-1963.
- [24] Tarel J, Hauti N. Fast visibility restoration from single color or gray level iamge[C]//Proceedings of IEEE international conference on computer vision (ICCV). Kyoto, Japan: IEEE computer society, 2009: 2201-2208.
- [25] 禹晶, 李大鹏, 廖庆敏. 基于物理模型的快速单幅图像去雾算法[J]. 中国图象图形学报, 2011, 16(4):516-521.
- YU Jing, LI Dapeng, LIAO Qingmin. Physics-based fast single image fog removal[J]. Journal of image and graphics, 2011, 16(4):516-521. (in Chinese)
- [26] McCann J J. Retinex at 40 [J]. Journal of electronic imaging, 2004, 13(1):6-145.
- [27] Frankle J, McCann J. Method and apparatus for lightness imaging: US, 4384336[P]. 1983.
- [28] 李晓光, 沈兰荪, 林健文. 一种高动态范围图像可视化算法[J]. 计算机应用研究, 2007, 24(11): 303-305.
- LI Xiaoguang, SHEN Lansun, LIN Jianwen. Algorithm for visualization of high dynamic range images[J]. Application research of computers, 2007, 24(11): 303-305. (in Chinese)
- [29] Kuang J, Yamaguchi H, Liu C, et al. Evaluating HDR rendering algorithms [J]. ACM transactions on applied perception (TAP), 2007, 4(2):1-27.

- [30] Funt B, Barnard K, ML. Is machine color constancy good enough? [C]//Processings of 5th European conference on computer vision. Freiberg, Germany: Lecture notes in computer science, 1998:445-459.
- [31] Cardei V, Funt B, Barnd K. White point estimation for uncalibrated images[C]//Proceedings of IS&T/SID seventh color imaging conference. Scottsdale, USA: John Wiley, 1999: 97-100.
- [32] Buchsbaum G. A spatial processor model for object color perception[J]. Journal of Franklin institute, 1980, 310(1):1-26.
- [33] Rizzi A, Gatta C, Marini D. A new algorithm for unsupervised global and local color correction[J]. Pattern recognition letters, 2003, 24(11):1663-1677.
- [34] Rizzi A, Gatta C, Marini D. From Retinex to automatic color equalization: issues in developing a new algorithm for unsupervised color equalization [J]. Journal of electronic imaging, 2004, 13(1):75-84.
- [35] 王守觉, 丁兴号, 廖英豪, 等. 一种新的仿生彩色图像增强方法[J]. 电子学报, 2008, 36(10): 1970-1973.
WANG Shoujue, DING Xinghao, LIAO Yinghao, et al. A novel bio-inspired algorithm for color image enhancement[J]. Acta electronica sinica, 2008, 36(10): 1970-1973. (in Chinese)
- [36] Stark J A. Adaptive image contrast enhancement using generalizations of histogram equalization[J]. IEEE transactions on image processing, 2000, 9(5):889-896.
- [37] Kim J Y, Kim L S, Hwang S H. An advanced contrast enhancement using partially overlapped sub-block histogram equalization[J]. Circuits and systems for video technology, 2002, 11(4):475-484.
- [38] 章怡, 王海峰. 一种区间可变的改进直方图均衡化算法研究[J]. 科学通报, 2012, 28(10):43-45.
ZHANG Yi, WANG Haifeng. Research of improving histogram equalization algorithm on variable section[J]. Bulletin of science and technology, 2012, 28(10):43-45. (in Chinese)
- [39] 吴成茂. 可调直方图均衡化的正则解释及其改进[J]. 电子学报, 2011, 39(6):1278-1295.
WU Chengmao. Regularization explanation of adjustable histogram equalization and its improvement[J]. Acta electronica sinica, 2011, 39(6):1278-1295. (in Chinese)
- [40] 吴成茂. 直方图均衡化的数学模型研究[J]. 电子学报, 2013, 41(3):598-602.
WU Chengmao. Studies on mathematical model of histogram equalization[J]. Acta electronica sinica, 2013, 41(3):598-602. (in Chinese)
- [41] Polesel A, Ramponi G, Mathews V J. Image enhancement via adaptive unsharp masking[J]. IEEE transactions on image processing, 2000, 9(3):505-510.
- [42] Van de Weijer J, Gevers T, Gijsenij A. Edge-based color constancy [J]. IEEE transaction on image processing, 2007, 16(9):2207-2214.
- [43] Gijsenij A, Gevers T. Color constancy using natural image statistics and scene semantics [J]. IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence, 2011, 33(4):687-698.
- [44] Geusebroek J M, Smeulders A W M. A six stimulus theory for stochastic texture [J]. International journal of computer vision, 2005, 62(1-2):7-16.
- [45] Brainard D H, Freeman W T. Bayesian color constancy [J]. Journal of the optical society of America, 1997, 14(7):1393-1411.
- [46] Ebner M. Evolving color constancy [J]. Pattern recognition letters, 2006, 27(11):1220-1229.
- [47] Stanikunas R, Vaitkevicius H, Kulikowski J J. Investigation of color constancy with a neural network [J]. Neural networks, 2004, 17(3):327-337.
- [48] Kratz L, Nishino K. Factorizing scene albedo and depth from a single foggy image[C]//Proceedings of the IEEE international conference on computer vision. Kyoto, Japan: IEEE press, 2009:1701-1708.
- [49] 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.
- [50] 李权合, 查宇飞, 熊磊, 等. 雾霾退化图像场景再现新算法[J]. 西安电子科技大学学报, 2013, 40(5):99-106.
LI Quanhe, ZHA Yufei, XIONG Lei, et al. Novel method for haze degraded image scene rendition[J]. Journal of Xidian university, 2013, 40(5):99-106. (in Chinese)
- [51] Kristofor B. Gibson, Truong Q, et al. On the effectiveness of the dark channel prior for single image dehazing by approximating with minimum volume ellipsoids[C]//Proceedings of IEEE international conference on acoustics, speech, and single processing. [S. l.]:IEEE press, 2011: 1253-1256.
- [52] Nayar S K, Narasimhan S G. Vision in bad weather[C]//Proceedings of IEEE international conference on computer vision (ICCV). Kerkyra, Greece: IEEE press, 1999:820-827.
- [53] Adelson E H. Lightness perception and lightness illusion in the new cognitive neurosciences[M]. Cambridge, MA: MIT press, 2000.
- [54] 饶瑞中. 现代大气光学[M]. 北京:科学出版社, 2012.
RAO Ruizhong. Modern astomphere [M]. Beijing: Science press, 2012. (in Chinese)
- [55] 蒋刚毅, 黄大江, 王旭, 等. 图像质量评价方法研究进展[J]. 电子与信息学报, 2010, 32(1):219-225.
JIANG Gangyi, HUANG Dajiang, WANG Xu, et al. Overview on image quality assessment methods[J]. Journal of electronics & information technology, 2010, 32(1):219-225. (in Chinese)
- [56] LAN Xia. Single image haze removal considering sensor blur and noise[J]. EURASIP journal on advances in signal processing, 2013(1):1-13.
- [57] He Renjie. Multiple scattering model based single image dehazing[C]//IEEE 8th conference on industrial electronics and applications. Piscataway, NJ:IEEE press, 2013:1-10.

(编辑:徐楠楠)