

中图法分类号: TP391 文献标志码: A 文章编号: 1006-8961(2011)09-1561-16

论文索引信息: 禹晶, 徐东彬, 廖庆敏. 图像去雾技术研究进展[J]. 中国图象图形学报, 2011, 16(9): 1561-1576

图像去雾技术研究进展

禹晶¹⁾, 徐东彬²⁾, 廖庆敏^{1),3)}

¹⁾(清华大学电子工程系, 北京 100084) ²⁾(交通运输部公路科学研究院, 北京 100088)

³⁾(清华大学深圳研究生院, 深圳 518055)

摘要:在雾、霾等天气条件下,大气粒子的散射作用导致成像传感器采集的图像严重降质。图像去雾技术的任务是去除天气因素对图像质量的影响,从而增强图像的能见度。本文归纳和总结了图像去雾技术的国内外研究现状。将现有的方法分为基于物理模型和非物理模型两类,分别详细阐述了这两类方法,分析它们各自的优势和不足,并总结了算法性能评价的无参考客观质量评测准则。最后,指出该技术的研究难点和发展趋势。

关键词: 图像去雾; 能见度; 颜色恒常性; 大气散射模型; 无参考客观质量评测

Image defogging: a survey

Yu Jing¹⁾, Xu Dongbin²⁾, Liao Qingmin^{1),3)}

¹⁾(Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084 China) ²⁾(Research Institute of Highway Ministry Transport, Beijing 100088 China) ³⁾(Graduate School at Shenzhen, Tsinghua University, Shenzhen 518055 China)

Abstract: Imaging in the atmosphere is often degraded by scattering due to atmospheric particles such as haze, fog and mist. The task of visibility enhancement techniques is to correct for the loss of contrast and color fidelity, which can lead to large improvement in image quality. In this paper, we present a review on established approaches for visibility enhancement of images taken under foggy and hazy conditions. These approaches are grouped into two categories, namely, physics based and non physics based. We illustrate them in detail and then characterize their strengths and limitations, respectively. Additionally, some reference-free objective quality metrics are provided for quantifying the performance related to contrast and chromatic diversity. Finally, further discussions are pointed out on technical challenges and future development.

Keywords: image defogging; visibility; color constancy; atmospheric scattering model; reference-free objective quality metrics

0 引言

计算机视觉系统已经广泛应用于户外场景,如城市交通、视频监控、航拍、遥感成像等,并发挥着非常重要的作用。然而,现有的计算机视觉系统对环境非常敏感。在雾、霾等天气条件下,大气中悬浮的大量微小水滴、气溶胶的散射作用,使水平能见度显

著降低,从而导致成像传感器采集的图像严重降质,这极大地影响和限制了户外系统的功能。

大气粒子与光线的交互作用包括散射和吸收两个过程^[1]。在近红外波段成像中,大气粒子的吸收作用占主导;而在可见光范围内,大气粒子的散射作用是造成图像降质的主要原因^[2]。随着物体到成像设备距离的增大,大气粒子的散射作用对成像的影响逐渐增加。这种影响主要由两个散射过程造

收稿日期:2010-09-21;修回日期:2010-11-06

第一作者简介:禹晶(1981—),女。清华大学电子工程系信息与通信工程专业在读博士研究生,主要研究方向为模式识别与图像处理。E-mail:j-yu08@mails.tsinghua.edu.cn。

成:1)物体表面的反射光在到达成像设备的过程中,由于大气粒子的散射而发生衰减。2)自然光因大气粒子的散射而进入成像设备参与成像。它们的共同作用导致采集的图像对比度、饱和度低及色调偏移,不仅影响图像的视觉效果,而且影响图像分析和理解的性能。

图像去雾技术(雾、霾等类似大气粒子的散射现象均可用米氏散射理论描述,为了描述的方便,简称为去雾)的主要任务是去除天气因素对图像质量的影响,从而增强图像的能见度。这是一个跨学科的前沿性课题,具有广阔的应用前景,近几年来已经成为计算机视觉和图像处理领域研究的热点问题之一,吸引了国内外很多研究人员的兴趣。该技术主要应用于计算机视觉的初级阶段,是目标检测与跟踪、目标分类与识别、目标行为分析与理解等中、高级阶段的基础。

McCartney 对不同天气条件下大气粒子的类型、大小和浓度进行了研究^[3]。Nayar 和 Narasimhan 对大气粒子的类型、大小和浓度造成各种天气的成因进行了简单分析^[4]。瑞利定律(Rayleigh-Jeans law)给出了散射系数 β 与入射光波长 λ 之间的关系^[3]。干洁的空气中大气分子的尺寸(10^{-4} mm)远小于可见光的波长,散射系数 β 与波长 λ 的4次方成反比。因此,短波长的蓝光占主导,因而天空呈现蓝色。雨、雾天气中所含小水滴的尺寸(> 1 mm)与可见光的波长相比很大,因此,散射系数几乎不依赖于波长。不同波段的可见光以同样的比例发生散射,因而纯净的雾看起来是白色或者灰色的。灰霾天气中所含气溶胶的尺寸范围($10^{-2} \sim 1$ mm)介于以上两者之间,因而灰霾呈现蓝色或褐色。

根据入射光的波长与大气粒子的相对大小,可将大气粒子对可见光的散射现象分为瑞利散射(Rayleigh scattering)和米氏散射(Mie scattering)。瑞利散射指大气分子的散射现象;而米氏散射指半径大于 $\frac{1}{10}$ 波长的大气粒子的散射现象^[3]。换句话说,在雾、霾等天气条件下,大气粒子的散射作用均可用米氏散射理论来描述。在下雨、下雪、冰雹等动态天气条件下的场景恢复比雾、霾等稳定天气下更为复杂。Garg 等人^[5]提出雨滴动力学模型,利用模型约束来区分雨和其他类型的信号,有效地检测并去除复杂场景中的雨滴。

图像去雾技术的研究工作开展较晚,可供参

考的文献并不多。到目前为止,尽管国内外研究机构已经取得了一定的研究成果,然而仍有待完善。与国内相比,国外的研究工作开展较早,且研究机构较多。在国外著名的研究机构中,美国国家航空航天局(NASA)的Langley研究中心(LRC)深入研究基于邻域(surround-based)的Retinex算法,对雾、烟、水下和夜晚图像进行增强(<http://dragon.larc.nasa.gov/retinex/>),并将其算法嵌入DSP便携式图像增强视觉系统中,处理分辨率为 256×256 的灰度图像可达到30帧/s,基本满足实时性的要求(<http://dragon.larc.nasa.gov/retinex/background/real-time.html>);哥伦比亚大学的计算机视觉实验室(http://www1.cs.columbia.edu/CAVE/projects/vision_fog/)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(<http://www1.cs.columbia.edu/CAVE/software/wild/index.php>);以色列的联合成像实验室(<http://www.ee.technion.ac.il/~yoav/lab-and-group/>)研究基于偏振滤波的方法,该方法对大气成像和水下成像均适用;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(<http://www.eee.manchester.ac.uk/research/groups/sisp/>)在图像对比度恢复方面进行了长期的研究,英国Dmist公司在此研究基础上开发了商业产品ClearVue(<http://www.dmist.com/products.htm>)。在国内的研究机构中,微软亚洲研究院与香港中文大学(Chinese University of Hong Kong)信息工程系的多媒体实验室合作,研究基于数据假设的单幅图像去雾方法,其成果较为显著,但与实际应用仍存在较大差距。其他研究所和高校的相关研究工作尚处于进一步发展中。

针对图像去雾技术的相关文献进行综述。依据是否依赖大气散射模型,将现有的方法分为两类:基于物理模型的方法(MB)和非物理模型的方法(NMB)。这种分类方式反映了算法的本质区别^[6]。

1 基于物理模型的方法

基于物理模型的方法利用大气散射模型,通过求解图像降质过程的逆过程来恢复清晰图像。它的

目的是使估计图像尽可能逼近真实图像,属于图像复原的范畴。

1.1 大气散射模型

在雾、霾天气条件下,大气中悬浮的大量粒子对光线有较强的散射作用。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,光强的衰减导致物体成像的亮度减弱,而大气粒子的前向散射作用导致图像模糊、分辨力下降;另一方面,自然光因大气粒子的散射而进入成像传感器参与成像,这种后向散射作用造成图像饱和度、对比度降低及色调偏移。

早期的研究工作主要专注于大气粒子前向散射作用的调制传递函数(MTF)^[7-10]。Yitzhaky 等人^[11]针对大气湍流和前向散射作用造成的模糊,估计大气调制传递函数(weather-predicted modulation transfer functions),通过频域解卷积对模糊图像进行复原,不涉及对比度和颜色校正的问题。文献[12]指出对于以水汽为主、半径不大于1 mm的大气粒子,前向散射作用造成的模糊效应很弱。而且在大多数成像应用中,对比度和颜色的校正能够在很大程度上改善图像质量^[13]。因此,近期基于物理模型的工作几乎均只考虑物体表面反射光的衰减和自然光的后向散射这两种作用。

Narasimhan 和 Nayar^[14]基于 McCartney 的衰减模型(attenuation model)和环境光模型(airlight model),推导出在雾、霾天气条件下单色大气散射模型(monochrome atmospheric scattering model),即窄波段传感器对场景成像的亮度为

$$I(x) = A\rho(x)e^{-\beta d(x)} + A(1 - e^{-\beta d(x)})$$

式中, A 为天空亮度(skylight), β 为大气粒子散射系数, $\rho(x)$ 和 $d(x)$ 分别为空间坐标 x 处的场景反射率和景深。近期几乎所有基于物理模型的方法均建立在该模型之上,只是利用方式上有所不同。

如图1所示,大气散射模型由两项组成。第1项 $A\rho(x)e^{-\beta d(x)}$ 表示衰减模型,也称为直接传播(direct transmission)或直接衰减(direct attenuation)。由于大气粒子的散射作用,一部分物体表面的反射光因散射而损失,未被散射的部分直接到达成像传感器,到达的光强随着传播的距离增大而呈指数衰减。第2项 $A(1 - e^{-\beta d(x)})$ 表示环境光模型。这是因为大气粒子对自然光的散射引起大气表现出光源的特性。环境光的强度随着传播距离的增大而逐渐增加。

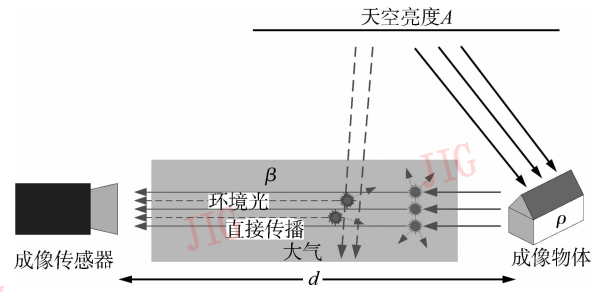


图1 大气散射模型

Fig. 1 Atmospheric scattering model

Nayar 和 Narasimhan 指出该模型的假设条件是单次散射和均匀大气介质,且不考虑散射系数受入射光波长的影响。因此,该模型不适用于数千米之外场景成像的衰减补偿。此外,较大的大气粒子对可见光的散射系数 β 方可认为与波长 λ 无关。

1.2 基于物理模型的方法分类

基于物理模型的方法实质上是利用大气散射模型或其变形形式,求解场景反射率。由于该模型包含3个未知参数,从本质上讲,这是一个病态反问题,不同的方法采用不同的方式近似计算模型中的参数。依据所需要的成像系统或成像场景的附加信息,可将基于物理模型的方法分为4类。前两类方法利用同一场景的多幅图像,即不同天气条件下获取的多幅图像,或者不同偏振程度的多幅图像。后两类方法试图从单幅图像出发估计景深或景深相关项。受单幅图像信息量的限制,第3类方法利用场景的先验信息或用户交互估计景深。然而,在实际应用中,通常都无法满足前3种方法所要求的特殊条件。为此,最近的研究工作热衷于探索第4类方法,这类方法通过对图像数据本身做各种假设,从单幅图像中恢复场景信息。

1) 利用不同天气条件下的多幅图像

这类方法^[4,14-16]的基础是同一场景中不同时间大气中粒子浓度不同的特性。利用两幅或多幅图像提供更多的信息,通过求解方程组来恢复场景。

Narasimhan 和 Nayar^[4,14-16]利用不同天气条件下同一场景的两幅或多幅图像,来估计场景的3维结构,进而恢复出清晰图像。Narasimhan 和 Nayar 提出二色大气散射模型(dichromatic atmospheric scattering model)^[4],并基于该模型分析了在不同天气条件下场景颜色的变化关系^[16]。在场景颜色变化的约束条件下,从两幅或多幅图像中恢复出场景的3维结构和颜色^[15]。但是,若场景中物体的颜色

接近雾、霾的颜色,则二色大气散射模型的恢复效果并不理想。为此,Narasimhan 和 Nayar^[14]提出单色大气散射模型,并基于该模型利用不同天气条件下两幅图像中同一像素点灰度值的变化,检测景深边缘(depth edges or depth discontinuities),将图像分割为不同景深的若干区域(同一区域内景深相同),来获得场景的 3 维结构,进而恢复图像。

2) 利用不同偏振度的多幅图像

这类方法^[17-24]的基础是光的偏振特性。利用偏振片(polarization filter)获取同一场景的不同偏振度(DOP)的两幅或多幅图像估计环境光,进而恢复清晰图像。

偏振滤波的方法很早就应用到成像中,用于消除偏振光^[25]的影响。当自然光源发出的入射光垂直于视线方向(环境光为水平偏振光),且光线散射较弱(大气分子或极小粒子的散射作用)时,旋转镜头前的偏振片方向,使其垂直于入射面,可以消除大气散射作用,获得一幅清晰图像。但是,在通常情况下,仅利用光学偏振滤波不能滤除场景中的雾、霾对成像的作用。

前期的研究工作^[26-27]认为偏振主要存在于人造光源中,而环境光是非偏振光^[28]。而 Schechner 等人^[18]则认为环境光是部分水平偏振光,而大气粒子的散射作用不会改变物体表面反射光的偏振状态。通过旋转偏振片获取同一场景的最大和最小偏振度的两幅图像^[17-20],利用它们之间的差值估计环境光,进而恢复图像。该算法对雾、霾天气和 underwater 成像^[22-24]均适用。但是,该算法的稳定性依赖于环境光的偏振状态和偏振度,如阴天时算法的稳定性变差,而浓雾时因无法利用光的偏振特性,算法失效。

3) 基于先验信息或用户交互的单幅图像方法

由于难以从场景中直接获取大气散射模型中的散射系数、天空亮度和景深的真实值,这类方法^[2,13,29-31]利用场景的先验信息或用户交互获得全部或部分参数。

Oakley 等人^[2,13]借助航拍相关飞行参数和摄像机标定来估计地形模型。但是,该算法需要估计的参数过多。Kopf 等人^[32]需要已知场景的 3 维纹理模型。Narasimhan 和 Nayar^[29]利用用户输入的信息,提出交互式恢复清晰图像的 3 种算法。算法 1 由用户指定天空区域和近处场景的颜色区域,将近处受天气影响小的颜色传递到其他区域。算法 2、3 由用户指定天空区域和消失点的位置,通过沿消失

线插值来估计连续范围的景深。由于算法 2 不适用于景深不连续和存在遮挡的都市场景,算法 3 提出了近似景深分割的策略。

4) 基于数据假设的单幅图像方法

最近提出的基于单幅图像的方法^[6,33-38]利用图像数据本身构造约束场景反照率或(和)景深的假设条件,估计模型参数。一般情况下,定义满足假设条件的目标函数和约束方程(组),使用最优化方法求解模型参数。这类方法取得了较好的效果。Oakley 和 Bu^[6]假设整幅图像中环境光为常数,以及像素局部均值和标准差存在比例关系,提出一种统计模型。通过优化全局代价函数,来校正图像的对比度。该算法适用于图像中环境光作用较均匀的情形。

Tan^[33]假设局部区域的环境光为常数,以及对比度显著增强。在马尔可夫随机场(MRF)模型的框架下,构造关于边缘强度的代价函数,使用图分割(graph cut)理论来估计最优光照。该算法旨在增强图像的对比度。尽管明显地改善了图像的能见度,然而,由于没有从物理模型上恢复真实场景反照率,恢复后的颜色显得过饱和,且在景深突变的边界产生严重的 Halo 效应。

Fattal^[34]假设图像局部区域的反照率为常向量(constant albedo),以及物体表面色度(surface shading)与介质传播(medium transmission)具有局部统计不相关性。利用独立成分分析(ICA)来估计常向量反照率。该算法本质上是非线性反问题的求解,它的性能在很大程度上取决于输入数据的统计特性。独立成分变化不显著或颜色信息不足将导致统计估计不可靠。

He 等人^[35]假设在至少一个颜色通道的局部区域内,场景反照率趋于 0,使用最小值滤波对介质传播函数进行粗估计。然后,借助图像抠图(image matting)算法对介质传播函数进行细化(refining)。这种细化方法实质上是一个大规模稀疏线性方程组的求解问题,具有很高的时间复杂度和空间复杂度。需要指出的是,图像抠图引入 α 通道的目的是使前景与背景过渡区域的边缘柔化或反混叠(anti-aliasing),而介质传播函数为场景辐射(scene radiance)的指数衰减因子。因此,将图像抠图算法用于介质传播函数的细化并不合理。并且在所用的代价函数中,数据项起着很小的作用。但若提高正则参数的取值,则景深突变边缘处的颜色易产生过冲失真(overshoot distortion)。

Kratz 等人^[36]假设场景反照率(scene albedo)和景深是统计独立的,并可用正则概率先验对它们建模。场景反照率的梯度建模为幂函数重尾分布先验(heavy-tail prior),而景深先验取决于特定场景,根据自然场景特征建模为 δ 分段常值函数或者高斯平滑函数。通过求解一个最大后验概率(MAP)估计问题,从而联合估计出场景反照率和景深。该算法需根据特定图像选取景深先验模型,且根据经验给定先验模型中的参数。

以上基于数据假设的单幅图像去雾算法均存在计算过程复杂、耗时的问题,难以适用于实际应用场景。Tarel 等人^[37]假设大气耗散函数在可行域中逼近最大值,且局部变化平缓,提出一种快速图像去雾算法。该算法利用中值滤波的变形形式估计大气耗散(atmospheric veil)函数。但是,中值滤波并非好的边缘保持滤波方法。因此,不恰当的参数设置易引入 Halo 效应。此外,该算法参数较多,不易调整。Yu 等人^[38]基于文献[37]的假设条件,提出一种自

动快速去雾算法。该算法利用快速双边滤波(fast bilateral filtering)方法^[39]估计大气耗散函数,进而解出场景反照率。该算法的时间复杂度达到图像像素数的线性函数,处理速度快。

1.3 基于物理模型的应用举例

基于物理模型的方法本质上是图像复原问题,它可利用景深信息,最大限度地恢复清晰图像。在基于物理模型的方法中,本文选取部分算法的典型场景及复原结果,阐明这类方法的应用情形。

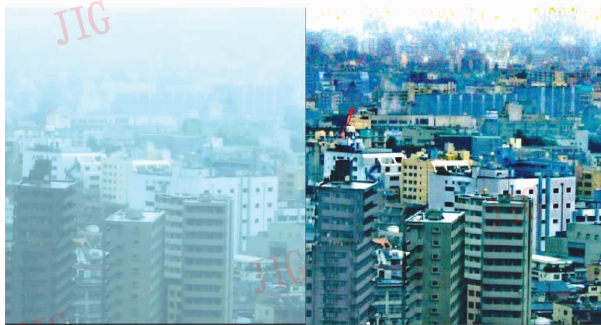
图2(a)显示了 Schechner 等人^[20]利用偏振滤波对灰霾图像的处理结果,远处景物的细节也得到明显的恢复。图2(b)显示了 Fattal^[34]对图像中非均匀雾的去除效果,使景物的面貌呈现出来。图2(c)显示了 Tan^[33]对雨天图像的处理结果,不同景深区域的细节均变得清晰可辨认。图2(d)左图为雾天中的航拍图像,场景被一层较均匀的雾覆盖,右图为 He 等人^[35]去雾的效果图,场景变得清晰。



(a) Schechner等人的算法^[20]



(b) Fattal的算法^[34]



(c) Tan^[33]



(d) He等人的算法^[35]



(e) Kratz等人的算法^[36]



(f) Yu等人的算法^[38]

图2 基于物理模型的图像复原结果

Fig. 2 Restored results with physics-based approaches

图(e)为 Kratz 等人^[36]处理的效果图,很好地恢复了真实场景的颜色(注意交通指示标识的黄色)。图(f)为 Yu 等人^[38]处理的效果图,有效地去除了图像中雾、霾的作用,恢复了场景的对比度和颜色,从而在很大程度上提高了图像的视见度。

2 非物理模型的方法

本文将基于大气散射模型以外的方法统称为非物理模型的方法。非物理模型的方法并不分析天气因素造成图像降质的物理成因。它是一个主观过程,目的是根据视觉感受改善图像的质量,属于图像增强的范畴。

2.1 颜色恒常性

颜色恒常性(color constancy)是人眼视觉系统(HVS)的自适应特性,指 HVS 能够在大范围不同颜色的光照条件下识别物体的真实颜色。Land 和 McCann^[40]认为人眼对物体表面颜色的感知与物体表面的反射特性密切相关,而与到达人眼的光谱特性关系不大。也就是说,在外界光照条件发生变化时,人眼对颜色的感知仍能在一定程度上保持相对不变,表现出颜色恒常性,如图 3 所示。事实上,Land 的发现还表明,即使在不同颜色的光照条件下,物体表面的不同颜色传到视网膜的信号相同时,

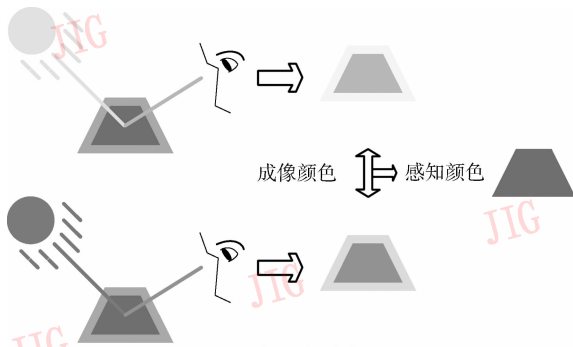


图 3 颜色恒常性

Fig. 3 Color constancy

人眼也能够辨认出物体表面的反射颜色^[41]。与 HVS 不同的是,成像系统不能对不同的光照条件做出相应的光谱响应,因而使采集的图像发生偏色,也就是说,整幅图像的颜色范围发生偏移。

Agarwal 等人^[42]针对颜色恒常性算法的相关文献进行了综述。依据所要达到的目的,可将颜色恒常性算法分为两类:彩色增强和白平衡(white

balance)。前者模拟 HVS 特性对彩色图像进行增强,使增强图像符合人眼直接观察场景的视觉感知;后者对不同颜色的光照造成的图像偏色进行校正,使校正图像的颜色逼近场景的真实颜色。

在雾、霾等天气条件下,大气粒子的散射作用导致场景成像的对比度低、颜色失真。因此,颜色恒常性算法可以很好地应用于图像去雾。非物理模型的方法无须求解大气散射模型,而是将大气散射模型中的环境光部分看成照度分量,对独立于照度的反射图像进行估计。

2.2 非物理模型的方法分类

非物理模型的方法旨在增强图像的对比度和校正图像的颜色。依据所要达到的目的,可将非物理模型的方法分为 3 类。前两类是基于颜色恒常性的方法,其中,前者为彩色增强方法,同时实现了对比度增强和颜色校正,而后者为白平衡方法,仅实现了颜色校正。第 3 类方法为对比度增强方法,这类方法的目的是增强图像全局、局部对比度,而不考虑色度映射或颜色恒常性的问题。

1) 彩色增强

研究人员在研究 HVS 特性的基础上,提出 Retinex 算法和自动颜色均衡化(ACE)算法。Retinex 算法和 ACE 算法是重要的局部对比度增强算法,也是重要的颜色恒常性算法,特别是 Retinex 算法,近年来成为备受关注的研究热点。

(1) Retinex 算法

Retinex 是由视网膜(retina)和大脑皮层(cortex)两个词组合而成。早在 1964 年,Land 从人眼对颜色的感知特性^[41]出发,提出基于颜色恒常性的 Retinex 理论^[43]。依据照度-反射模型,一幅图像可表示为反射分量和照度分量乘积的形式,其中,反射分量取决于物体表面的反射特性,而照度分量取决于环境光照特性。基于 Retinex 理论的计算模型的目的是从图像中去除场景照度分量的影响,获得实际反射分量。

迄今为止,国内外已经提出多个版本的 Retinex 算法及其改进算法^[40-41,43-63]。Retinex 算法同时实现了全局和局部对比度增强、高动态范围(HDR)压缩以及颜色恒常性。其中,HDR 压缩^[64-65]超出本文讨论的范畴。Kimmel 等人^[54]提出一种变分模型,将照度估计问题转换为二次规划问题,并为已有的 Retinex 算法建立了一个统一框架。该算法利用梯度投影算法求解,并利用多分辨率技术加速算法的

执行。McCann 等人^[66]总结了 Retinex 算法 40 年的发展。按照发展历程将 Retinex 算法分成 3 类。

① 基于路径的 Retinex 算法是最早的版本。Land 首次提出基于路径的 Retinex 算法的计算模型^[40,44]。对于图像中的各像素,在其邻域内搜索 1 维随机路径,计算各路径上相邻像素比值的乘积得到相对亮度值,所有路径上的平均值,即为该像素的新像素值。Brainard 和 Wandell^[45]研究了在多路径、长路径的情形下基于路径算法的收敛性。Rizzi 等人^[53]利用布朗运动(Brownian motion)生成随机分布的路径。Provenzi 等人^[59]定义了一个数学表达式来描述基于路径的 Retinex 算法,并利用该数学定义分析算法特性,以及调整参数的影响。Elad 等人^[60]提出一种降低计算复杂度的变分方法。Provenzi 等人^[63]提出一种随机打点 Retinex (RSR)算法,采用 2 维随机打点方式代替随机路径,这样的改进更易于调整参数,提高算法的执行速度。基于路径的 Retinex 算法的问题是计算复杂度高,以及参数的不确定性,如路径的数目、轨迹和长度。

② 迭代 Retinex 算法是一种迭代形式的 Retinex 算法^[50,57,67],由 Frankle 和 McCann 提出^[67],也称为多分辨率 Retinex 算法。在这个版本的算法中,采用矩阵计算代替路径计算。在路径计算中,依次将像素添加到路径中,以串行方式比较像素值,根据路径的长度确定距离函数;而在矩阵计算中,比值和乘积运算可并行处理,根据迭代次数确定距离函数。Funt 等人^[57]发布了 McCann99 算法和 Frankle-McCann 算法的 MATLAB 代码。合适的迭代次数可使处理结果的视觉效果达到最优,然而,难以自动选取最优参数。Ciurea 等人^[56]提出自动调整参数的方案,但是,搜索最优迭代次数仍然是一个难点。迭代 Retinex 算法的问题是参数的不确定性,参数的选取对最终结果起决定性作用。

③ 基于邻域的 Retinex 算法的理论基础为照度分量的强度一般变化缓慢,在频域中表现为低频成分;而不同物体表面材质的反射率差异较大,表现为高频成分。因此,这类算法采用低通滤波的方法估计照度分量。Land 于 1986 年提出了最早的基于邻域的 Retinex 算法,也称为中心/邻域(center/surround) Retinex 算法^[47]。对于图像中的各像素,计算该像素值与邻域内像素加权值的非线性比值,即为该像素的新像素值。通过平滑函数的空域卷积获得邻域内像素的加权值,权重由平滑函数的系数

给出。Jobson 等人^[48]对使用不同类型平滑函数的算法性能进行了评价,由此确定了高斯函数,提出单尺度 Retinex (SSR)算法,并将其扩展到多尺度。多尺度 Retinex (MSR)算法^[68]是计算不同尺度的 3 幅 SSR 图像的平均值。MSR 算法结合了小尺度的对比度增强特性和大尺度的颜色恒常性。基于邻域的版本存在严重的颜色失真问题。由于其本质是基于灰度假设(gray world assumption)的颜色校正,当图像整体或局部区域的颜色违背灰度假设时,处理后的颜色将去饱和而变为灰色调,称为灰化(graying-out)效应。此外,在灰度值突变的边界,由于一侧像素的空域卷积受另一侧像素的影响,因此,基于邻域的版本也易引入 Halo 效应。

为此,Jobson 等人提出颜色复原的多尺度 Retinex (MSRCR)算法^[49,58]。但是,该算法的颜色复原过程实际上是引入原图像色度的非线性函数,来补偿 MSR 算法处理过程中损失的颜色信息,并不是恢复场景的真实颜色。因此,MSRCR 算法的颜色补偿实质上违背了颜色恒常性的原理^[51]。Meylan 等人^[61]提出一种基于中心/邻域 Retinex 模型的自适应滤波方法,根据图像边缘方向自适应调整滤波器的形状,以此抑制图像边缘处的 Halo 效应。

(2) ACE 算法

Rizzi 等人^[69-70]基于 HVS 的中心/邻域侧抑制机理,提出 ACE 算法。ACE 算法计算图像中各像素与邻域内其他像素的差值,用中心像素与邻域像素之间的欧氏距离作为邻域像素的距离权重函数,然后计算加权和,并归一化。在大多数情形下,选取的邻域范围为整幅图像。这个过程称为色度空间自适应(chromatic spatial adjustment),实现了颜色恒常性和对比度调整。

Rizzi 等人^[70]将 ACE 算法的实现机理和基于路径的 Retinex 算法进行了类比分析。这两种算法具有共同的属性,能够同时增强图像的全局和局部对比度,并充分利用颜色的空间分布来恢复图像颜色。与 Retinex 算法不同的是,ACE 算法解决了 Retinex 算法难以确定参数的问题,并且 ACE 算法综合了 WP(white point)和 GW(gray world)颜色校正机制,在色度还原方面优于 Retinex 算法。但是,ACE 算法的主要问题是时间复杂度过高,以及在低对比度区域也会产生局部灰化效应。

ACE 算法的时间复杂度为 $O(n^2)$,其中, n 为图像的像素数。针对这个问题,Artusi 等人^[71]提出

ACE 算法的加速技术,首先在图像中随机采样部分像素,仅对这些像素提取全局信息,以减少时间开销,然后对图像中所有像素提取局部信息,来补偿高频损失。但是,这样的加速在较大程度上以牺牲算法性能为代价。Provenzi 等人^[72]针对 RSR 算法和 ACE 算法的不足,提出一个新的计算模型 RACE,有效地融合了 RSR 算法的局部 WP 机制和 ACE 算法的局部 GW 机制。

2) 白平衡

从数学角度来讲,白平衡是一个欠定问题。所有的方法均建立在约束表面反射或光照颜色统计特性的假设条件之上。白平衡方法又可大致分为两类。一类是基于图像低阶特征的直接方法;另一类是基于特定数据库学习的方法。基于低阶特征的方法可直接用于图像的白平衡校正,主要包括 WP (white-point) 算法^[73-74],GW (gray-world) 算法^[75]、灰色调 (shades-of-gray) 算法^[76]和 GE (gray-edge) 算法^[77]。GW 算法和 WP 算法是两种简单的基于灰度像素假设的算法。GW 算法的假设条件是 R、G、B 颜色分量的平均值相等,而 WP 算法的假设条件是 R、G、B 颜色分量的最大值相等。Lam^[78]结合 GW 和 WP 算法的假设条件,提出一种二次灰度映射函数。Finlayson 和 Trezzi^[76]提出基于闵可夫斯基 (Minkowski) 范数的灰色调算法。该算法的假设条件是 R、G、B 颜色分量的 p 阶闵可夫斯基范数相等,而 WP 算法和 GW 算法是该算法的两个不同特例。Weijer 等人^[77]提出灰度边缘 (gray edge) 的假设,并结合以上 3 种算法建立了一个统一框架。Gijzenij 等人^[79-80]利用差分图像的积分威布尔分布 (integrated Weibull distribution) 的两个参数^[81-82]描述自然图像特征;并基于特定自然场景图像的威布尔参数,提出一种颜色恒常性算法的选取和融合方案。基于低阶特征的方法可以快速有效地校正灰霾图像的颜色。

基于学习的方法在特定数据库的训练阶段,学习表面反射或光照颜色分布的相关先验知识;利用学习过程中获取的先验知识来估计光照的颜色。基于学习的方法包括色域映射 (gamut mapping) 方法、概率统计方法和机器学习方法。色域映射方法开始于 Forsyth 在 3 维 RGB 空间的研究工作^[83],此后,提出色域约束照度估计算法^[84]、基于偏导数色域映射算法^[85]等。该类算法搜索输入图像的色域 (input gamut) 和正则色域 (canonical gamut) 的映射关系,来

估计光照颜色。概率统计方法中有基于贝叶斯的算法^[86]、颜色相关 (color by correlation) 算法^[87]等,而机器学习方法中有基于神经网络的算法^[88-89]、支撑向量机 (SVM) 算法^[90]、遗传算法^[91]等。

3) 对比度增强

前期的研究工作利用图像对比度增强的基本算法改善雾、霾图像的对对比度,包括线性映射、增益/偏移校正 (gain/offset correction)、直方图均衡化 (HE)、伽马校正、对数变换、USM 锐化 (USM)^[92]等全局增强算法,以及局部直方图均衡化^[93-94]、同态滤波^[54]等局部增强算法。全局算法增强了图像中某些局部区域的对比度,但是,同时降低了其他局部区域的对比度。而局部算法利用图像的局部特性,同时增强图像的全局和局部对比度。文献[95-96]对增益/偏移校正、伽马校正、直方图均衡化、同态滤波与 MSRCR 算法的性能进行了比较与评价。

局部直方图均衡化^[97-98]能够增强图像各部分的对比度,克服了全局变换的不足。但是,局部处理存在块效应、运算量大和颜色失真等问题。Kim 等人^[98]提出一种块部分重叠的直方图均衡化 (POSHE) 算法,力求在运算效率和图像质量之间达到折中。

USM 锐化、同态滤波方法与基于邻域的 Retinex 算法在数学上是类似的。USM 锐化是从原图像中减去它的平滑图像。线性减法实际上是一种高通滤波操作。同态滤波在计算上更加接近基于邻域的 Retinex 算法,所不同的是同态滤波在高通滤波之前使用对数变换压缩图像的动态范围,而 Retinex 算法在图像平滑处理之后使用对数变换。研究表明,在滤波处理之前使用非线性变换易产生 Halo 效应。

研究人员基于 HVS 的全局和局部自适应特性,提出一类仿生彩色图像增强方法,增强彩色图像的全局和局部对比度,而不考虑颜色恒常性的问题。与 MSRCR 算法、McCann99 算法和 ACE 算法的基本思想相同,这类方法模拟人眼直接观察场景的视觉感知。然而,MSRCR 算法、McCann99 算法和 ACE 算法的计算量均较大,MSRCR 算法计算大尺度模板的空域卷积,McCann99 算法在多级分辨率下计算相对亮度,ACE 算法比较图像中任意两个像素的亮度和位置之间的关系。Vonikakis 等人^[99]基于 HVS 的中心/邻域侧抑制机理,提出一种 2 维灰度映射函数,能够同时增强图像亮区域和暗区域的细节,具有很高的计算效率。该算法仅对图像的亮度分量做处

理,而对色调分量和饱和度分量保持不变。王守觉等人^[100]基于HVS的亮度适应和侧抑制机理,提出一种可变幂次的幂函数变换曲线,自适应地增强图像暗区域的对比度和亮度;并根据中心像素和邻域像素的亮度关系,增强图像的局部对比度,提出利用双边滤波计算邻域像素的平均亮度,以抑制图像边缘处的Halo效应;线性颜色复原过程保持了图像的颜色度信息。

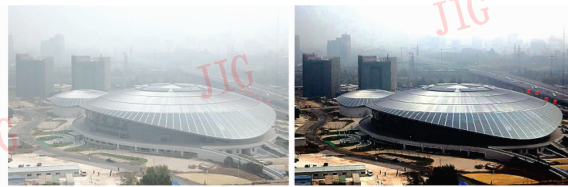
2.3 非物理模型的应用举例

非物理模型的方法本质上是对比度增强和颜色校正。尽管这类方法最初的提出并非是为了图像去雾的目的,然而这类方法可以很好地恢复景深大致相同的场景。在非物理模型的方法中,本文展示了部分算法应用于雾、霾图像的增强结果,阐明这类方法的应用情形。

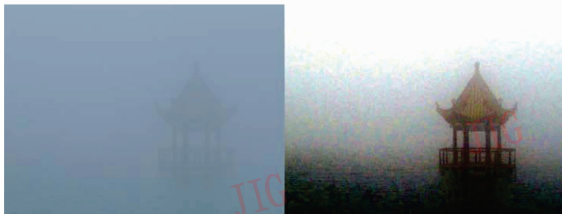
图4(a)左图为灰霾天气下拍摄的国家奥体中心羽毛球馆,右图为本文利用直方图均衡化(HE)进行图像增强的效果。从图中可以看到,直方图均衡化在一定程度上可以去除雾、霾对成像的影响,但是,它会造成细节信息的损失,使平坦区域出现伪轮

廓(注意天空区域)。图4(b)左图为大雾弥漫的湖中亭子,右图为本文利用灰色调算法^[76]和简单线性拉伸的处理结果,有效地实现了颜色校正和对比度增强(注意湖水和天空的颜色)。图4(c)为Vonikakis等人^[99]对低对比度的雾天图像进行增强的结果。

图4(d)为NASA的Langley研究中心应用MSRRCR算法对图像进行去雾的结果,增强了图像的能见度。图4(e)为本文利用ACE算法对灰霾图像的增强结果,左图为灰霾笼罩的街道,右图为增强图像,从图中可见,ACE算法提高了全局和局部对比度,再现了场景的颜色,使细节变得清晰可辨。因此,ACE算法应用于雾、霾场景的图像增强是行之有效的。MSRRCR和ACE算法均能实现对比度增强和颜色校正。对这两种算法进行比较,MSRRCR算法对于提高全局对比度和增强暗区域的细节,取得较好的效果,但是对于改善亮区域的细节,效果不明显。ACE算法在全局对比度、亮区域和暗区域的细节增强方面,均能达到较好的效果^[99]。



(a) HE 算法



(b) 灰色调算法



(c) Vonikakis 等人的算法^[99]



(d) Jobson 等人的算法^[49]



(e) ACE 算法

图4 非物理模型的图像增强结果

Fig. 4 Enhanced results with non-physics-based approaches

3 方法评述与性能评测

3.1 方法评述

基于物理模型的方法和非物理模型的方法各有优势和不足,主要区别表现在:

1) 是否利用物理模型 基于物理模型的方法是从大气散射模型出发,通过增加假设条件或弱化限制条件,来估计模型参数,进而恢复清晰图像。非物理模型的方法是根据主观视觉效果进行对比度增强和颜色校正。

2) 是否估计场景景深 基于物理模型的方法首先估计场景的景深信息,因而能够充分恢复不同景深的场景反射率。非物理模型的方法由于没有考虑场景的景深信息,不能充分校正景深较大区域的对比度和颜色。

3) 是否借助辅助数学工具 基于物理模型的方法实质上是利用大气散射模型求解场景反射率。由于参数 A 、 d 和 β 的真实值都是未知量,因而这是一个病态反问题。求解病态反问题的最有力工具是最优化方法。因此,基于物理模型的方法一般借助最优化方法估计模型中的参数,这样,模型参数的估计无疑是复杂耗时,且随着图像尺寸的增加,时间开销不可接受。非物理模型的方法是基于图像本身进行像素或邻域处理,计算相对简单,可应用于实时性要求的场合。

4) 是否降质清晰图像 基于物理模型的方法一般不会损伤清晰图像的质量,因此,能够应用于自动处理的场合。非物理模型的方法通常会使得清晰图像出现不可预测的失真。

物理模型的建立和优化求解是基于物理模型方法的关键。对于轻雾、雾等天气下拍摄的图像,基于物理模型的方法取得了较好效果。但是,对于大雾、浓霾等天气下拍摄的图像,现有的基于物理模型的算法是失效的。因此,有必要结合基于物理模型和非物理模型这两类方法,以达到更好的效果。

3.2 性能评测

图像质量评测是图像质量改善领域的得力助手,它可以作为比较各种处理算法性能优劣的基准。图像质量评测可以采用由人来评价的主观方法,也可以采用由算法评价的客观方法。主观评测是最常用、最直接的方法。但是,主观方

法需多次重复实验,耗时费力,且易受观测者个人因素的影响。而客观评测是用数学的方法计算得出,算法评价自动、公开。

通常情况下,图像去雾算法的评价没有真实图像可做参考,属于无参考客观质量评测范畴。仅能依据对降质图像和复原(或增强)图像的分析比较来衡量算法的性能。迄今为止,研究人员提出了多种图像去雾算法,但是还没有形成统一的质量评测准则,因此多采用主观评测方法对算法作评价。如前所述,图像去雾算法主要涉及图像颜色 and 对比度两个方面的评价。本文归纳总结了在颜色和对比度方面的相关评测准则如下:

1) 颜色评价

(1) 色调极坐标直方图

色调极坐标直方图(hue polar histogram)用于度量图像的偏色和色调多样性^[101]。色调用色度盘上关于红色轴的夹角来度量,色调值以角度表示的范围为 $[0, 360)$ 。色调极坐标直方图在单位圆中表示图像中所有色调出现的概率。在色调极坐标直方图的基础上,定义了两个评测准则:集中性(concentration)和离散度(scatter)。集中性定义为在极坐标表示下周期均值(circular mean)对应的半径。若色调在圆中均匀分布,则周期均值不存在,半径为0。集中性越大,图像色调分布越集中;反之,图像色调分布越分散。离散度定义为数据偏离周期均值的统计方差,表示色调以周期均值为中心的分布宽度。离散度越小,图像色调分布越窄;反之,图像色调分布越宽。高集中性和低离散度表明图像色调单一,对应地,图像视见度低。

图5显示了晴天和雾天拍摄的同一场景的图像。图6显示了这两幅图像的色调极坐标直方图。为了直观地显示,色调用它代表的颜色绘制,黑实线对应的角度为周期均值。需要指出的是,对饱和度大于一定阈值的像素色调进行统计。根据它们的色调极坐标直方图,计算得到晴天图像的离散度为2.4946,集中性为 4.1875×10^{-4} ,而雾天图像的离散度为0.8236,集中性为0.0022。很明显,晴天图像比雾天图像有更高的离散度和更低的集中性。可见,这两个评测准则适用于在色调还原方面对算法性能进行评价。



(a) 晴天 (b) 雾天

图5 同一场景的晴天和雾天图像

Fig. 5 Sunny and foggy images of the same scene

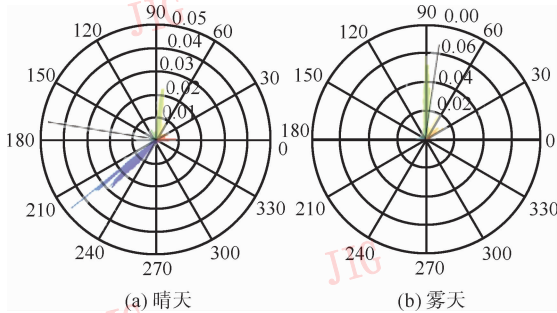


图6 图5的色调极坐标直方图

Fig. 6 HPHs of the images in Fig. 5

(2) RGB 图像主成分分析

RGB 图像主成分分析 (PCA) 的特征值用于度量色调多样性和饱和度强弱。设 PCA 的特征值按从大到小顺序分别用 λ_1 、 λ_2 和 λ_3 表示, 主轴离差 (deviation) 定义为 $\frac{\lambda_2 + \lambda_3}{\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3}$ 。主轴指第一主成分特征向量的方向。主轴离差越大, 表明图像色调越

丰富, 且饱和度越高, 反之, 图像色调越单一, 且饱和度越低。根据上述公式, 计算得到晴天图像的主轴离差为 0.077 9, 雾天图像的主轴离差为 0.013 4。图 7 为图 5 所示的晴天和雾天图像的第 3 主成分图像, 从图中可以看出, 雾天图像的第 3 主成分图像方差显著降低。可见, 这个评测准则适用于在颜色还原方面对算法性能进行评价。



(a) 晴天 (b) 雾天

图7 图5的第3主成分图像

Fig. 7 Third principal-component images corresponding to the images in Fig. 5

(3) 直方图相似度

由于雾、霾的存在, 环境光对成像的作用导致图像的像素整体移向直方图灰度级的亮端。一种好的图像复原 (或增强) 算法应使处理后的图像看起来真实、自然。也就是说, 原图像和结果图像的直方图形状大体上应保持一致^[102]。直方图相似度测量两个直方图分布之间的相似程度, 可以用两个直方图分布的相关系数 (correlation coefficient) 和巴氏距离 (Bhattacharyya distance) 作为基于直方图相似度的评测准则。

图 8 比较了 Tan、Fattal、He 等人 和 Tarel 等

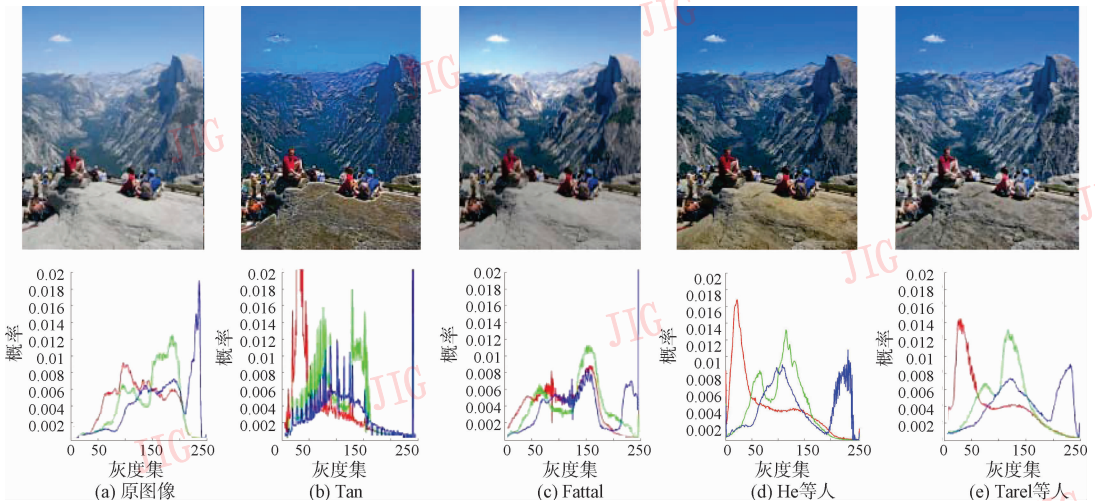


图8 Tan、Fattal、He 和 Tarel 等人算法的去雾图像以及相应的 R、G、B 颜色分量直方图比较

Fig. 8 Fog removal results obtained by Tan, Fattal, He, and Tarel and their corresponding red, green and blue component histograms

人^[33-35,37]算法的去雾图像 (<http://perso.lcpc.fr/tarel.jean-philippe/visibility/>)以及相应的R、G、B颜色分量直方图。根据相关系数和巴氏距离的定义,计算得到这4幅去雾图像与原图像直方图的相关系数分别为-0.079 2,0.459 3,0.472 9,0.751 8,巴氏距离分别为0.590 5,0.299 0,0.278 5,0.194 9。相关系数越大,匹配度越高;巴氏距离越小,匹配度越高。由此可见,Tarel等人^[37]的算法更好地保持了直方图的形状。

2) 对比度评价

(1) 全局对比度

Michelson对比度^[103]和Weber对比度是两种简单的全局对比度。直方图均匀度(uniformity measure)测量待测直方图和均匀分布的直方图之间的相似程度。

(2) 局部对比度

VCM(visual contrast measure)^[104]将图像划分为子区域,计算各子区域的方差,统计方差大于给定值的子区域数所占总数的比例。Peli对比度^[105]是一种局部带限(local band-limited)对比度。Bringier等人^[106]将其扩展到彩色图像的对比度评价。此后,在Peli研究的基础上,发展了基于频带分解的多种无参考局部带限对比度^[107-108]。

4 结 论

尽管研究人员对图像去雾做了一定的研究工作,取得了较好的成果,但是该技术还有很多重要的工作有待进一步深入研究。

在计算机视觉的实际应用场合中,图像去雾技术存在众多难点:

1) 自动 基于多幅图像或用户交互的方法,受到场景、天气或成像设备等限制;而智能交通、视频监控等应用要求算法从单幅图像数据本身出发,并自动执行。

2) 鲁棒 户外应用的场景、环境复杂多样,要求算法不仅适应不同能见度的雾、霾等天气及晴朗天气条件,而且适应各种不同景深的场景。

3) 实时 作为计算机视觉的初级阶段,算法应具备实时性,才能适应实际应用的需求。基于物理模型的方法通常使用最优化方法估计模型参数,这必然增大了计算复杂度和时间开销。而在非物理模型的方法中,部分算法能够满足实时性的要求,但

是,其性能达不到要求。综上所述,研究自动、鲁棒和实时的单幅图像去雾算法是一个亟待解决的问题。

为了评价图像去雾算法的性能,还应建立一个公开的数据库,包括各种天气条件下采集的图像。数据库的建立将为研究人员提供一个算法性能评价的平台,这将对该技术的研究和发展起到重要的推动作用。但是,完整地收集不同天气条件下同一场景的图像是一项极其困难的工作。哥伦比亚大学的WILD数据库,也只是采集了不同天气条件下一个场景的多幅图像。

图像去雾技术在户外视觉系统中有着广泛的应用,属于图像处理 and 计算机视觉领域的研究热点之一,吸引着越来越多研究人员的兴趣。实际应用场合要求算法具备自动、鲁棒和实时性。目前,国内外的相关研究远没有达到成熟阶段,因此,该研究领域仍具有很大的发展空间。

参考文献 (References)

- [1] Zhou Miaoliang, Qian Hui. Exploring atmospheric degradation model of landscape [J]. Journal of Computer Aided Design & Computer Graphics, 2001, 13(9): 793-799. [朱森良, 钱徽. 自然景观物中大气退化模型的研究 [J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2001, 13(9): 793-799.]
- [2] Oakley J P, Satherley B L. Improving image quality in poor visibility conditions using a physical model for contrast degradation [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1998, 7(2): 167-179.
- [3] McCartney E J. Optics of the Atmosphere: Scattering by Molecules and Particles [M]. New York: John Wiley and Sons, 1976.
- [4] Nayar S K, Narasimhan S G. Vision in bad weather [C]// Proceedings of IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV). Kerkyra, Greece: IEEE, Piscataway, NJ, USA, 1999: 820-827.
- [5] Garg K, Nayar S K. Detection and removal of rain from videos [C]// Proceedings of IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). Washington, DC, USA: IEEE Computer Society, 2004, 1: 528-535.
- [6] Oakley J P, Bu H. Correction of simple contrast loss in color images [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2007, 16(2): 511-522.
- [7] Kopeika N S. General wavelength dependence of imaging through the atmosphere [J]. Applied Optics, 1981, 20(9): 1532-1536.
- [8] Kopeika N S. Spatial-frequency-and wavelength-dependent effects of aerosols on the atmospheric modulation transfer function [J].

- Optical Society of America, 1982, 72(8):1092-1094.
- [9] Kopeika N S. Effects of aerosols on imaging through the atmosphere: a review of spatial frequency and wavelength dependent effects [J]. *Optical Engineering*, 1985, 24(4): 707-712.
- [10] Bissonnette L R. Imaging through fog and rain [J]. *Optical Engineering*, 1992, 31(5):1045-1052.
- [11] Yitzhaky Y, Dror I, Kopeika N S. Restoration of atmospherically blurred images according to weather-predicted atmospheric modulation transfer functions [J]. *Optical Engineering*, 1997, 36(11):3064-3072.
- [12] Lutomirski R F. Atmospheric degradation of electrooptical system performance [J]. *Applied Optics*, 1978, 17(24):3915-3921.
- [13] Tan K, Oakley P J. Physics-based approach to color image enhancement in poor visibility conditions [J]. *Optical Society of America*, 2001, 18(10):2460-2467.
- [14] 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.
- [15] Narasimhan S G, Nayar S K. Vision and the atmosphere [J]. *International Journal of Computer Vision*, 2002, 48(3):233-254.
- [16] Narasimhan S G, Nayar S K. Chromatic framework for vision in bad weather [C]//*Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*. Hilton Head Island, SC, USA: IEEE Computer Society, 2000, 1:1598-1605.
- [17] Shwartz S, Namer E, Schechner Y Y. Blind haze separation [C]//*Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*. New York, NY, USA: IEEE Computer Society, 2006, 2:1984-1991.
- [18] Schechner Y Y, Narasimhan S G, Nayar S K. Polarization-based vision through haze [J]. *Applied Optics*, 2003, 42(3):511-525.
- [19] 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, 5888:1-10.
- [20] Schechner Y Y, Narasimhan S G, Nayar S K. Instant dehazing of images using polarization [C]//*Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, Kauai, HI, USA: IEEE Computer Society, 2001, 1: I 325- I 332.
- [21] Schechner Y Y, Averbuch Y. Regularized image recovery in scattering media [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2007, 29(9):1655-1660.
- [22] Schechner Y Y, Karpel N. Recovering scenes by polarization analysis [C]//*MTS/IEEE Oceans*. Kobe, Japan: Marine Technology Society, 2004, 3:1255-1261.
- [23] 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, 1:1543-1563.
- [24] Schechner Y Y, Karpel N. Recovery of underwater visibility and structure by polarization analysis [J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2005, 30(3):570-587.
- [25] Shurcliff W A, Ballard S S. *Polarized Light* [M]. Van Nostrand: Princeton NJ, 1964:98-103.
- [26] Coulson K L. Polarization of light in the natural environment [C]//*SPIE in Polarization Considerations for Optical Systems II*. San Diego, CA, USA: SPIE, 1989, 1166:2-10.
- [27] Quinby-Hunt M S, Erskine L L, Hunt A J. Polarized light scattering by aerosols in the marine atmospheric boundary layer [J]. *Applied Optics*, 1997, 36(21):5168-5184.
- [28] Gan X, Schilders S P, Gu M. Image enhancement through turbid media under a microscope by use of polarization gating method [J]. *Journal Optical Society of America*, 1999, A 16(9):2177-2184.
- [29] Narasimhan S G, Nayar S K. Interactive (de) weathering of an image using physical models [C]//*ICCV Workshop on Color and Photometric Methods in Computer Vision (CPM CV)*. Nice, France: IEEE Computer Society, 2003.
- [30] Sun Yubao, Xiao Liang, Wei Zhihui, et al. Method of defogging image of outdoor scenes based on PDE [J]. *Journal of System Simulation*, 2007, 19(16):3739-3744, 3769. [孙玉宝, 肖亮, 韦志辉, 等. 基于偏微分方程的户外图像去雾方法 [J]. *系统仿真学报*, 2007, 19(16):3739-3744, 3769.]
- [31] Chen Gong, Wang Tang, Zhou Heqin. A novel physics based method for restoration of foggy day images [J]. *Journal of Image and Graphics*, 2008, 13(5):888-893. [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.]
- [32] Kopf J, Neubert B, Chen B, et al. Deep photo: model-based photograph enhancement and viewing [J]. *ACM Transactions on Graphics (SIGGRAPH Asia08)*, 2008, 27(5):111-116.
- [33] Tan R T. Visibility in bad weather from a single image [C]//*Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*. Alaska, USA: IEEE Computer Society, 2008:1-8.
- [34] Fattal R. Single image dehazing [J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2008, 27(3):1-9.
- [35] 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.
- [36] Kratz L, Nishino K. Factorizing scene albedo and depth from a single foggy image [C]//*Proceedings of IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV)*. Kyoto, Japan: IEEE Computer Society, 2009:1701-1708.
- [37] Tarel J, Hauti N. Fast visibility restoration from a single color or gray level image [C]//*Proceedings of IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV)*. Kyoto, Japan: IEEE Computer Society, 2009:2201-2208.
- [38] Yu Jing, Li Dapeng, Liao Qingmin. Physics-based fast single

- image fog removal [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2011, 37(2): 143-149. [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.]
- [39] Paris S, Durand F. A fast approximation of the bilateral filter using a signal processing approach [J]. *International Journal of Computer Vision*, 2007, 81(1): 24-52.
- [40] Land E H, McCann J J. Lightness and retinex theory [J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1971, 61(1): 1-11.
- [41] Land E H. The Retinex theory of color vision [J]. *American Scientist*, 1977, 237(6): 108-128.
- [42] Agarwal V, Abidi B R, Koschan A, et al. An overview of color constancy algorithms [J]. *Journal of Pattern Recognition Research*, 2006, 1(1): 42-54.
- [43] Land E H. The retinex [J]. *American Scientist*, 1964, 52(2): 247-264.
- [44] Land E H. Recent advances in the Retinex theory and some implications for cortical computations [C]//*National Academy Sciences: Color Vision and the Natural Image*. New York, USA: National Academy of Sciences, 1983, 80: 5163-5169.
- [45] 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.
- [46] Terzopoulos D. Image analysis using multigrid relaxation methods [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1986, 8(2): 129-139.
- [47] Land E H. An alternative technique for the computation of the designator in the Retinex theory of color vision [J]. *National Academy Sciences*, 1986, 83(10): 3078-3080.
- [48] Jobson D J, Rahman Z, Woodell G A. Properties and performance of a center/surround Retinex [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 1997, 6(3): 451-462.
- [49] Jobson D J, Rahman Z, Woodell G A. A multiscale retinex for bridging the gap between color images and the human observation of scenes [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 1997, 6(7): 965-976.
- [50] McCann J. Lessons learned from mondrians applied to real images and color gamuts [C]//*Proceedings of IS&T/SID Eighth Color Imaging Conference: Color Science, Systems and Applications*. Scottsdale, AZ, USA: Society for Imaging Science and Technology, 1999: 1-8.
- [51] Barnard K, Funt B. Investigations into Multi-scale Retinex [C]//*Proc. of Colour Imaging in Multimedia*. Derby UK: IEEE, 1998, 9-17.
- [52] Funt B, Ciurea F. Control parameters for retinex [C]//*Proceedings of Ninth Congress of the International Colour Association*, Rochester, NY, USA: SPIE, 2001, 4421: 287-290.
- [53] Rizzi A, Marini D, Rovati L L, et al. Unsupervised corrections of unknown chromatic dominants using a Brownian-path-based Retinex algorithm [J]. *Journal of Electronic Imaging*, 2003, 12(3): 431-441.
- [54] Kimmel R, Elad M, Shaked D, et al. A variational framework for Retinex [J]. *Computer Vision*, 2003, 52(1): 7-23.
- [55] Orsini G, Ramponi G, Carrai P, et al. A modified retinex for image contrast enhancement and dynamics control [C]//*Proceedings of IEEE International Conference on Information Processing (ICIP)*. Barcelona, Spain: IEEE Computer Society, 2003, 3: 393-396.
- [56] Ciurea F, Funt B. Tuning Retinex parameters [J]. *Journal of Electronic Imaging*, 2004, 13(1): 58-64.
- [57] Funt B V, Ciurea F, Mccann J. Retinex in Matlab [J]. *Journal of Electronic Imaging*, 2004, 13(1): 48-57.
- [58] Rahman Z, Jobson D J, Woodell G A. Retinex processing for automatic image enhancement [J]. *Journal of Electronic Imaging*, 2004, 13(1): 100-110.
- [59] 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.
- [60] 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.
- [61] Meylan L, Süsstrunk S. High dynamic range image rendering with a Retinex-based adaptive filter [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2006, 15(9): 2820-2830.
- [62] Liu Jiapeng, Zhao Yuming, Hu Fuqiao. A nonlinear image enhancement algorithm based on single scale retinex [J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 2007, 41(5): 685-688. [刘家朋, 赵宇明, 胡福乔. 基于单尺度 Retinex 算法的非线性图像增强算法 [J]. 上海交通大学学报, 2007, 41(5): 685-688.]
- [63] Provenzi E, Fierro M, Rizzi A, et al. Random spray retinex: a new Retinex implementation to investigate the local properties of the model [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2007, 16(1): 162-171.
- [64] Sobol R. Improving the Retinex algorithm for rendering wide dynamic range photographs [J]. *Journal of Electronic Imaging*, 2004, 13(1): 65-74.
- [65] Kuang J, Yamaguchi H, Liu C, et al. Evaluating HDR rendering algorithms [J]. *ACM Transactions on Applied Perception (TAP)*, 2007, 4(2): 1-27.
- [66] McCann J J. Retinex at 40 [J]. *Journal of Electronic Imaging*, 2004, 13(1): 6-145.
- [67] Frankle J, McCann J. Method and Apparatus for Lightness Imaging: US, 4384336. [P]. 1983.
- [68] Rahman Z, Jobson D J, Woodell G A. Multi-scale retinex for color image enhancement [C]//*Proceedings of International Conference on Image Processing*. Lausanne, Switzerland: IEEE Signal Processing Society, 1996, 3: 1003-1006.
- [69] 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.
- [70] 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.
- [71] Artusi A, Gatta C, Marini D, et al. Speed-up technique for a local automatic colour equalization model [J]. *Computer Graphics Forum*, 2006, 25(1): 5-14.
- [72] Provenzi E, Gatta C, Fierro M, et al. A spatially variant White-Patch and Gray-World method for color image enhancement driven by local contrast [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2008, 30(10): 1757-1770.
- [73] Funt B, Barnard K, Martin L. Is machine colour constancy good enough? [C]//*Proceedings of 5th European Conference on Computer Vision*, Freiburg, Germany; *Lecture Notes in Computer Science*, 1998: 445-459.
- [74] 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.
- [75] Buchsbaum G. A spatial processor model for object color perception [J]. *Journal of Franklin Institute*, 1980, 310(1): 1-26.
- [76] Finlayson G, Trezzi E. Shades of gray and colour constancy [C]//*Proceedings of Twelfth Color Imaging Conference: Color Science and Engineering Systems, Technologies, and Applications*. Scottsdale, Arizona; *The Society for Imaging Science and Technology*, 2004: 37-41.
- [77] van de Weijer J, Gevers T, Gijsenij A. Edge-based color constancy [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2007, 16(9): 2207-2214.
- [78] Lam E Y. Combining gray world and retinex theory for automatic white balance in digital photography [C]//*Proceedings of Ninth International Symposium on Consumer Electronics*, Macau; *IEEE Computer Society*, 2005: 134-139.
- [79] Gijsenij A, Gevers T. Color constancy using natural image statistics [C]//*Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*. Minneapolis, Minnesota, USA; *IEEE Computer Society*, 2007: 1-8.
- [80] 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.
- [81] Geusebroek J M, Smeulders A W M. Fragmentation in the vision of scenes [C]//*Proceedings of IEEE International Conference on Computer Vision*. Mediterranean, France; *IEEE Computer Society*, 2003, 1: 130-135.
- [82] 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.
- [83] Forsyth D A. A novel algorithm for color constancy [J]. *International Journal of Computer Vision*, 1992, 5(1): 5-36.
- [84] Finlayson G D, Hordley S D, Tasl I. Gamut constrained illuminant estimation [J]. *International Journal of Computer Vision*, 2006, 67(1): 93-109.
- [85] Gijsenij A, Gevers T, van de Weijer J. Generalized gamut mapping using image derivative structures for color constancy [J]. *International Journal of Computer Vision*, 2008, 86(2-3): 127-139.
- [86] Brainard D H, Freeman W T. Bayesian color constancy [J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1997, 14(7): 1393-1411.
- [87] Finlayson G D, Hordley S D, Hubel P M. Color by correlation: a simple, unifying framework for color constancy [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2001, 23(11): 1209-1221.
- [88] Cardei V, Funt B V, Barnard K. Estimating the scene illumination chromaticity using a neural network [J]. *Journal of the Optical Society of America*, 2002, 19(12): 2374-2386.
- [89] Stanikunas R, Vaitkevicius H, Kulikowski J J. Investigation of color constancy with a neural network [J]. *Neural Networks*, 2004, 17(3): 327-337.
- [90] Funt B V, Xiong W. Estimating illumination chromaticity via support vector regression [C]//*Proceedings of Twelfth Color Imaging Conference: Color Science and Engineering Systems and Applications*, Scottsdale, AZ, USA; *The Society for Imaging Science and Technology*, 2004: 47-52.
- [91] Ebner M. Evolving color constancy [J]. *Pattern Recognition Letters*, 2006, 27(11): 1220-1229.
- [92] Polesel A, Ramponi G, Mathews V J. Image enhancement via adaptive unsharp masking [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2000, 9(3): 505-510.
- [93] Ai Mingjing, Dai Longzhong, Cao Qinghua. A self-adaptation image enhancement method for fog elimination in foggy environment [J]. *Journal of Computer Simulation*, 2009, 26(7): 244-247. [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.]
- [94] Zhu Pei, Zhu Hong, Qian Xueming, et al. An image clearness method for fog [J]. *Journal of Image and Graphics*, 2004, 9(1): 126-130. [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): 126-130.]
- [95] Rahman Z, Woodell G A, Jobson D J. A comparison of the multiscale Retinex with other image enhancement techniques [C]//*Proceedings of 50th Annual Meeting of the Society-of-Imaging-Science-and-Technology*, Cambridge, MA, USA; *SOC Imaging Science & Technology*, 1997: 426-431.
- [96] Joshi K R, Kamathe R S. Quantification of retinex in enhancement of weather degraded images [C]//*Proceedings of International Conference on Audio, Language and Image Processing (ICALIP)*, Shanghai, China; *IEEE Computer Society*, 2008: 1229-1233.
- [97] Stark J A. Adaptive image contrast enhancement using generalizations of histogram equalization [J]. *IEEE Transactions*

- on Image Processing, 2000, 9(5):889-896.
- [98] 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.
- [99] Vonikakis V, Andreadis I, Gasteratos A. Fast centre-surround contrast modification [J]. IET Image Processing, 2008, 2(1):19-34.
- [100] 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. [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.]
- [101] Chambah M. Reference-free image quality evaluation for digital film restoration [J]. Colour: Design & Creativity, 2008, 4(3):1-16.
- [102] Chambah M, Rizzi A, Gatta C, et al. Perceptual approach for unsupervised digital color restoration of cinematographic archives [C]//Color Imaging VIII: Processing, Hardcopy, and Applications, Santa Clara, CA, USA: SPIE, 2003, 5008:138-149.
- [103] Michelson A A. Studies in Optics [M]. Chicago: University of Chicago Press, 1927.
- [104] Jobson D J, Rahman Z, Woodell G A, et al. A comparison of visual statistics for the image enhancement of forest aerial images with those of major image classes [C]//Visual Information Processing XV, Orlanod, FL, USA: SPIE-Int. Soc. Opt. Eng(USA), 2006, 624601:1-8.
- [105] Peli E. Contrast in complex images [J]. Journal of the Optical Society of America, 1990, 7(10):2032-2040.
- [106] Bringier B, Richard N, Larabi M C, et al. No-reference perceptual quality assessment of colour image (EUSIPCO) [C]//Proceedings of European Signal Processing Conference, Florence, Italy: EURASIP, 2006.
- [107] Lubin J. A Visual Discrimination Model for Imaging System Design and Evaluation [M]//Arthur RB Menendez. Models for Target Detection and Recognition: in Memory of Arthur Menendez. Singapore: World Scientific Publishing, 1995, 245-283.
- [108] Winkler S, Vandergheynst P. Computing isotropic local contrast from oriented pyramid decompositions [C]//Proceedings of International Conference on Image Processing (ICIP). Kobe, Japan: IEEE Computer Society, 1999, 4:420-424.