

# 图像去雾技术研究综述与展望

郭 璠, 蔡自兴, 谢 斌, 唐 璘

(中南大学 信息科学与工程学院, 长沙 410083)

(guofansu@163.com)

**摘 要:** 图像去雾技术是图像处理和计算机视觉领域共同关心的重要问题。通过从图像处理和物理模型的研究角度对图像去雾技术进行综述, 综合了近年来提出的典型的图像去雾方法的基本原理和最新研究进展, 并对一些典型的及最新提出的去雾方法, 给出了其视觉上的去雾效果和客观的评估数据。最后展望了图像去雾技术的未来研究方向, 并给出了一些建议。

**关键词:** 图像去雾; 图像处理; 物理模型; 图像增强

**中图分类号:** TP391.41; TP391 **文献标志码:** A

## Review and prospect of image dehazing techniques

GUO Fan, CAI Zi-xing, XIE Bin, TANG Jin

(School of Information Science and Engineering, Central South University, Changsha Hunan 410083, China)

**Abstract:** Image dehazing is an important issue that interests both digital image processing and computer vision areas. This paper surveyed the recent techniques for image dehazing from the point view of physical model and digital image processing. Some fundamental principles of typical methods were summarized and the state-of-the-art progress was presented. For some typical, new haze removal algorithms, both the perceptual visual effect and objective evaluation data were presented to illustrate their haze removal performance. Finally, some future research topics on image dehazing were suggested.

**Key words:** image dehazing; image processing; physical model; image enhancement

近年来,随着计算机软硬件技术的不断发展,对有雾天气图像的景物影像进行去雾处理已经成为可能,这反过来又对去雾图像的清晰度和真实感提出了新的要求。在雾天情况下,由于场景的能见度降低,图像中目标对比度和颜色等特征被衰减,致使室外视频系统无法正常工作,因此需要在视频图像中消除雾气对场景图像的影响。事实上,图像去雾一直是计算机视觉领域研究的重要内容,其主要应用是视频监控、地形勘测和自动驾驶等领域,因此,自动性和实时性就成为了这些研究关注的重点。本文即在分析和借鉴了若干计算机视觉领域的研究成果的基础上,从图像处理和物理模型的研究角度,对图像去雾技术进行了综述性的介绍,并给出了这一领域的最新研究进展。

### 1 图像去雾技术分类

目前对于雾天图像的处理方法主要分为两类:雾天图像增强和雾天图像复原。雾天图像的增强方法不考虑图像降质原因,适用范围广,能有效地提高雾天图像的对比度,突出图像的细节,改善图像的视觉效果,但对于突出部分的信息可能会造成一定损失。雾天图像复原是研究雾天图像降质的物理过程,并建立雾天退化模型,反演退化过程,补偿退化过程造成的失真,以便获得未经干扰退化的无雾图像或无雾图像的最优估计值,从而改善雾天图像质量。这种方法针对性强,得到的去雾效果自然,一般不会有信息损失,处理的关键点是模型中参数的估计。对于每一类方法,按照去雾方法的相似性进一步归纳为不同的子类方法:基于图像处理的雾天图像增

强方法分为全局化的图像增强方法和局部化的图像增强方法;基于物理模型的雾天图像复原方法则包括基于偏微分方程的雾天图像复原、基于深度关系的雾天图像复原和基于先验信息的雾天图像复原。图1详细描述了这种分类层次。

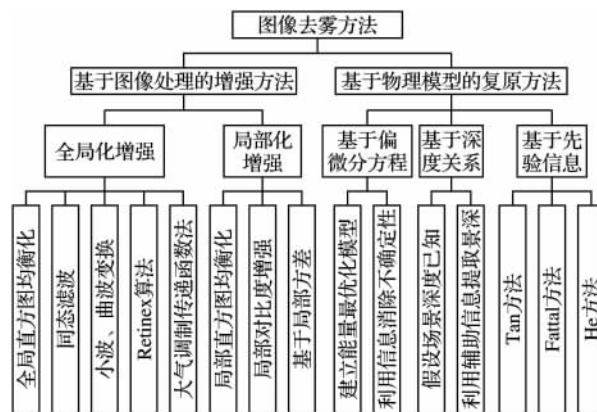


图1 主要去雾方法分类

#### 1.1 基于图像处理的雾天图像增强

##### 1.1.1 全局化的图像增强方法

全局化的雾天图像增强方法是指对灰度值的调整是由整幅雾天图像的统计信息决定的,与被调整点所处的区域无关。由于雾天下场景的退化程度与其深度相关,而一幅图往往包含复杂的深度信息,所以全局化的处理方法往往不能得到理想的效果,但当雾天图像的场景相对简单时,不失为一种有效的途径。

典型的全局化雾天图像增强方法主要有6种。1) 全局直

收稿日期: 2010-03-11; 修回日期: 2010-04-23。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(90820302)。

作者简介: 郭璠(1982-),女,湖南常德人,博士研究生,主要研究方向:图像处理、虚拟实验环境; 蔡自兴(1938-),男,福建莆田人,教授,博士生导师,主要研究方向:人工智能、智能控制; 谢斌(1983-),男,湖南长沙人,讲师,博士,主要研究方向:智能机器人及信号处理; 唐璘(1967-),男,湖南武冈人,教授,博士生导师,主要研究方向:计算机视觉、嵌入式系统、机器人。

方图均衡化算法。该方法的基本思想是把有雾图像的直方图变换为均匀分布的形式,这样就增加了像素灰度值的动态范围从而达到增强雾天图像整体对比度的效果。大部分文献在进行去雾算法对比时均以直方图均衡化的去雾效果作为参照<sup>[1-4]</sup>。2) 同态滤波算法。该算法是一种把频率过滤和灰度变换相结合的图像增强处理方法,也是一种把照明反射模型作为频域处理的基础,利用压缩亮度范围和增强对比度来改善图像质量的处理技术。该方法及其推广在彩色图像增强方面得到了广泛的应用<sup>[5]</sup>。3) 小波方法。小波与多尺度分析在对比度增强上的应用取得了很大进展。例如,在多个尺度上对雾天图像的细节进行均衡化<sup>[6]</sup>,对图像的细节有很好的锐化作用。4) Retinex 算法。Retinex 是一种描述颜色不变性的模型,它具有动态范围压缩和颜色不变性的特点,对由于光照不均而引起的低对比度彩色图像具有很好的增强效果。近年来受到研究者的很大关注,包括单尺度 Retinex 算法 (Single-Scale Retinex, SSR) 和多尺度 Retinex 算法 (Multi-Scale Retinex, MSR) 的应用都取得了很大的成功。芮义斌等人根据 Retinex 理论及 MSR 算法,采用正态截取拉伸对有雾图像进行处理,取得了较好的图像去薄雾效果<sup>[7]</sup>。5) 曲波变换。曲波是一种在小波变换基础上发展起来的新的多尺度分析方法,由于它特别适合于各向异性奇异性特征的信号处理,因此能够很好地弥补小波变换在图像的曲线边缘增强方面的局限性。Brian Eriksson 利用曲波变换的优势,采用基于曲波的消失点检测对雾天图像进行了自动去雾处理<sup>[8]</sup>。6) 基于大气调制传递函数 (Atmospherical Modulation Transfer Function, MTF) 增强雾天图像。该方法的原理是:首先通过对大气调制传递函数的预测,近似估计大气对图像质量的退化过程。当得到先验信息时,通过预测公式计算出相应的湍流调制传递函数和气溶胶调制传递函数,再由前两者的乘积得到总的大气调制传递函数。然后利用大气调制传递函数在频域内对天气退化图像进行复原,并对户外景物图像中由大气调制传递函数造成的衰减进行补偿。文献[9-10]均是采用大气调制传递函数对天气退化图像进行清晰化处理。

#### 1.1.2 局部化的图像增强方法

对于上述全局化的图像增强方法而言,由于此类方法是对整幅图像进行操作,而且在确定变换或转移函数时是基于整个图像的统计量。而在实际应用中常常需要对图像某些局部区域的细节进行增强,但這些局部区域内的像素数量相对于整幅图的像素数量往往较小,在参与整幅图的计算时其影响常被忽略掉,并且从整幅图像得到的函数也不能保证这些所关心的局部区域得到所需的增强效果。因此,需要根据所关心的局部区域的特性来计算变换或转移函数,并将这些函数用于所关心的区域,以得到所需的增强效果。

目前主要有3类局部化的图像增强方法。1) 局部直方图均衡化方法<sup>[11-13]</sup>,也称块重叠直方图均衡化,是一种标准的自适应直方图均衡化方法 (Adaptive Histogram Equalization, AHE)。其基本思想是将直方图均衡化运算分散到图像的所有局部区域,通过局部运算的叠加自适应地增强图像局部信息。此外, Kim 等人提出了非重叠子块直方图均衡化的算法<sup>[14]</sup>, Zimmerman 等人提出了插值直方图均衡化方法<sup>[15]</sup>,翟艺书等人采用块重叠直方图均衡化实现了对雾天图像的清晰化处理<sup>[16]</sup>;王萍等人利用插值自适应直方图均衡化算法很好地解决了雾天图像的低对比度问题<sup>[3]</sup>。在此基础上, Stark 等人建立了广义局部直方图均衡化的数学描述,并通过参数

的调整很好地实现了对均衡化图像效果的控制。2) 局部对比度增强方法,有3种方式: a) 常数增益 (Constant Gain Trace, CGT) 算法。该算法求得雾天图像的局部均值并设定比例常数,在雾天图像的每个像素位置上根据变换函数放大图像的局部变化; b) 饱和度反馈算法。该算法将雾天图像转换到 HIS 色彩空间中进行处理; c) 自适应饱和度反馈算法。该算法通过有饱和度分量和亮度分量的局部相关性来确定反馈的极性和程度,从而使饱和度反馈算法具有了自适应能力。3) 基于局部方差的增强方法<sup>[1]</sup>。该算法通过计算并比较局部标准方差的大小来判断局部图像的增强程度,然后以灰度均值为基准进行局部灰度拉伸。此算法同样适用于深度信息多变且对比度较低的雾天图像,但相对于局部直方图均衡化算法在噪声方面有所增加。因此,如何在增强细节和抑制噪声方面找到较好的折中点是该方法需要进一步研究的问题。

#### 1.2 基于物理模型的雾天图像复原

##### 1.2.1 基于偏微分方程的雾天图像复原

由于利用大气信息条件或场景深度复原雾天图像的方法不能局部修正恢复结果,所以对于场景深度变化较大的图像,部分区域的对比度仍然比较低,不能很好满足应用要求。因此在某些对图像的色彩清晰度和对比度有较高要求的场合,采用偏微分方程的图像去雾方法得到了广泛的应用<sup>[17]</sup>。为了对图像恢复结果较差的区域进行局部修正需要操纵图像的梯度场,求解关于图像梯度场的偏微分方程。这一方法已经被广泛地应用到图像编辑,自然场景图像景物提取等领域中。针对雾天图像处理,可借助大气散射模型,建立户外图像全局去雾和局部去雾的能量最优化模型,推导相应的包含图像梯度和场景景深的偏微分方程。同时利用用户提供的简单附加信息消除恢复中的不确定性,实现仅从一幅降质图像的去雾恢复。由于偏微分方程良好的边界条件,应用局部去雾模型可以局部修正改善恢复效果,并光滑地融合到全局去雾的结果中。此后,为了消除图像去雾恢复的不确定性,基于模糊逻辑的雾天图像对比度增强算法得到了研究者们的重视<sup>[18]</sup>。该算法通过对降质图像进行规范化预处理,降低不同雾况对灰度级分布范围的影响,并对规范化后的图像,根据大气散射对对比度衰减的影响规律,在模糊域内实现对比度增强处理。实践表明,该算法可以有效提高雾天降质图像的对比度,视觉效果改善明显。但以上这些方法的一个重要不足就是图像深度信息的获取或算法所要求的渐进修改大气散射系数都需要通过用户的交互操作。

##### 1.2.2 基于深度关系的雾天图像复原

降质图像的场景深度信息是复原雾天图像的一条重要线索。根据场景深度信息是否已知可将此种复原方法分为两类。一类是假设场景深度信息已知的方法。该方法由 Oakley 等人最早提出<sup>[19]</sup>。这种基于物理模型来复原场景对比度的方法使用一个简单的高斯函数对场景中的光路进行预测,取得了较好的复原效果,并且不需要天气预测信息,但此方法需要雷达装置获取场景深度。另一类是用辅助信息进行场景深度提取的方法。Narasimhan 等人从多个不同角度对提取场景深度信息的方法进行了研究。例如,利用二值散射模型从不同天气条件下的彩色图片提取场景信息<sup>[20-21]</sup>;利用不同散射光的偏振特性,通过不同方向上的偏振光恢复场景深度信息<sup>[22-24]</sup>;通过确定计算深度不连续的边界,从两幅不同天气条件下的灰度图像中提取场景深度<sup>[25]</sup>;通过交互式景深估计算法以及已知的3D模型来获取场景点深度<sup>[26]</sup>,例如 Kopf 方

法即是利用已知的 3D 模型获取景深,从而复原雾天图像<sup>[27]</sup>。在此基础上,近年来又有中国的研究者提出了一种新的图像复原方法<sup>[28]</sup>。该方法首先对雾天场景的光学成像建模,然后借助于一张晴天图像和一张雾天图像的参考图像,计算出场景各点的深度比关系。这些提取场景深度的方法与大气散射模型相结合,最终实现雾天图像的复原。但以上几种提取场景深度的方法也存在着一定的局限性,比如利用偏振光的方法只能应用于大气散射程度较弱的薄雾,而不适于大雾天气。而其他一些方法则需要用到不同天气状态下相同景物的图像或需要用户的交互,因而很难满足对变换场景的实时图像处理需求。

1.2.3 基于先验信息的雾天图像复原

传统的去雾方法往往只能有限地提升降质图像的清晰度,由于忽略了真实图像的雾气分布不均的事实而以整体统一处理的方式去雾,致使图像某些部分显得不够清晰,而某些部分却因过度处理而失真。近年来,众多研究者致力于如何针对单幅降质图像按照图中雾气浓度的变化,达到彻底去雾的效果。在这方面的早期工作是由 Tan 等人完成的<sup>[29]</sup>。他们通过统计发现无雾图像相对于有雾图像必定具有较高的对比度,从而利用最大化复原图像的局部对比度来达到去雾的

目的,该方法的缺点在于复原后的图像颜色常常过于饱和。此外,Fattal 等人在假设光的传播和场景目标表面遮光部分是局部不相关的前提下,估计出场景的辐照度,并由此推导出传播图像<sup>[30]</sup>。由于该方法基于数理统计,并且要求具有足够的颜色信息,所以当处理浓雾天气下颜色暗淡的图像,该方法无法得到可信的传播图像,从而复原后的图像失真较大。为了解决以上几种方法的问题,何恺明等人最近提出了基于暗原色的单一图像去雾技术<sup>[31]</sup>。该方法通过收集大量不受雾气影响的图像,发现了一套能识别雾气浓度的暗原色统计规律。即把图像分成多个子块,每个子块中都有一些亮度很低的像素。这些“黑点”通常存于物体阴影、黑色物体以及具有鲜艳颜色的物体中。根据这一规律,只需按雾气浓度局部修复图像各部分的颜色,就能有效地达到很好的去雾效果,但当场景目标的亮度与大气光相似时,暗原色先验信息将失效。

表 1 是主要去雾方法的优缺点比较。这些方法尽管在解决问题的思路存在着根本的区别,但是由于各种方法各有优缺点,所以在实际应用中,根据需要多采用“累试法”进行处理。即对于一幅有雾图像,根据研究人员的判定来处理,如果采用增强方法改善灰度对比度的效果好,就采用增强方法;若采用图像复原方法可行,就依据退化模型进行复原处理。

表 1 主要去雾方法对比分析

类别	子类	去雾方法	优点	缺点	主要应用
基于图像处理的雾天图像增强方法	全局化增强	全局直方图均衡化	1)算法简单 2)对单景深图像的复原效果好	难反映景深多变的图像中局部景深的变化	雾天图像处理装置(专利)
		同态滤波	1)能去掉由光照不均所产生的黑斑暗影 2)能较好地保持图像的原始面貌	需要两次傅立叶变换,占用较大的运算空间	1)遥感薄云 2)红外图像 3)水下图像 4)指纹增强
		小波变换	能较好地增强图像的细节	无法解决图像过亮、过暗或是光照不均的情况	1)红外图像 2)中医诊断图像
		曲波变换	能很好地弥补小波变换在图像的曲线边缘增强方面的局限性	只能相对地提高图像质量,并不能实现真正意义上的去雾	1)SAR图像增强 2)陶瓷显微图像
		大气调制传递函数	对退化图像的去模糊效果较好	需对雾气浓度和场景深度进行估计,难以应用	复原天气退化图像
	局部化增强	局部直方图均衡化	可使所关心的局部区域得到所需的增强效果	运算量大、存在局部块效应现象	雾天视频清晰化装置系统
		局部对比度增强	能强化局部图像细节	不能改善整幅图像动态范围	1)医学图像 2)红外图像
		基于局部方差	算法简单,能有效地增强和保留图像的细节	相对于直方图均衡化算法在噪声方面有所增加	景深多变、对比度低的雾天图像
	基于偏微分方程	偏微分方程	能有效提高雾天降质图像的对比度,视觉效果改善明显	图像深度的获取和大气散射系数的修改都需要用户参与	1)图像修复 2)图像去噪
	基于物理模型的雾天图像复原方法	假设景深已知	图像复原效果好	需要雷达装置获取场景深度	雾天图像复原
		利用信息提取景深(如文献[27]方法)	能有效地增强图像的清晰度	条件苛刻,非自动,很难满足实时图像处理需求	雾天图像复原
		文献[29]方法	针对单幅图像,且去雾图像的对比度大大提高	复原后的图像颜色常常过于饱和且有光晕伪影	单幅彩色或灰度有雾图像的去雾处理
		文献[30]方法	在薄雾条件下能够获得较好的清晰化效果	无法处理浓雾天气下的图像以及灰度图像	单幅彩色图像的去雾处理
	基于先验信息	文献[31]方法	去雾结果自然,图像的颜色逼真、清晰度高	计算代价大,处理时间长	单幅彩色或灰度有雾图像的去雾处理

2 图像去雾效果的客观评估标准

图像去雾中有待进一步研究的问题还很多,特别是图像

去雾效果的客观、定量评价问题尚未得到很好解决。这主要是因为大多数的图像质量评价方法均为完全参考(full-reference)方法,即需要知道同一场景在晴天下的图像作为评

价的参考图像<sup>[32]</sup>。但在实际应用中,这一条件往往过于苛刻而难以满足,因此盲评方法更为实用。目前,针对图像去雾效果的盲评方法主要是由 Hautiere 等人所提出的可见边梯度法<sup>[33]</sup>。该方法根据由 Jourlin 和 Pinoli 所提出的对数图像处理(Logarithmic Image Processing, LIP)模型,采用原有雾图像与去雾图像的新可见边集合数目比( $e$ )、平均梯度比( $\bar{r}$ )和黑色像素点所占图像大小百分比( $\sigma$ )三个指标,从不同角度客观评价图像的去雾效果。

$$e = \frac{n_r - n_0}{n_0} \tag{1}$$

$$\bar{r} = \frac{\bar{g}_r}{\bar{g}_0} \tag{2}$$

$$\sigma = \frac{n_s}{dim_x \times dim_y} \tag{3}$$

其中: $n_0$ 和 $n_r$ 分别表示原有雾图像 $I_0$ 和去雾复原图像 $I_r$ 中可见边的数目, $\bar{g}_r$ 表示去雾图像的平均梯度, $\bar{g}_0$ 表示原有雾图像的平均梯度, $n_s$ 表示采用 koheler 图像分割方法<sup>[34]</sup>后变为黑色像素点的像素数目, $dim_x$ 和 $dim_y$ 分别表示图像的宽和高。

对于每种算法,其目标都是尽可能地提高清晰化的速度,并在不丢失视觉信息的同时,增加图像的对比度。因此,算法运行时间越短,去雾效率越高; $e$ 和 $\bar{r}$ 值越大, $\sigma$ 值越小,去雾效果越好。

3 图像去雾效果

为了直观地考查各种去雾算法的去雾效果和客观的去雾性能,采用 Matlab 6.5 在 Pentium(R) D 3.00 GHz 2 GB 内存的 PC 机上对几种典型的基于图像处理的雾天图像增强方法和最新提出的基于物理模型的雾天图像复原方法进行大量的实验仿真,并使用算法的运行时间和其客观评价指标值 $e$ 、 $\bar{r}$ 和 $\sigma$ 来评估其去雾性能。实验数据库主要是从国外研究者的网站上下载,例如 Tan<sup>[35]</sup>、Fattal<sup>[36]</sup>和 He<sup>[37]</sup>等研究者的个人网站均给出了对比实验的图像数据库。表 2 是对图 2 中原有雾图像进行清晰化处理的评估结果示例。

表 1 几种典型去雾方法的性能比较(图像大小 576 × 768)

类别	去雾方法名称	运行时间/s	$e$	$\bar{r}$	$\sigma$ /%
基于图像处理的雾天图像增强方法	直方图均衡化	8.547 0	0.48	1.15	0.20
	小波变换	1.563 0	0.13	1.02	3.06
	多尺度 Retinex	211.891 0	1.09	1.23	0.77
基于物理模型的雾天图像复原方法	文献[27]方法	需人工参与	0.35	1.12	1.05
	文献[29]方法	527.562 7	1.71	1.40	0.76
	文献[30]方法	64.953 8	0.23	1.09	1.05
	文献[31]方法	32.153 5	0.80	1.27	0.30

由表 2 可以看出,就算法运行时间而言,在增强方法中运行时间最短的是小波变换,而在复原算法中所需时间最短的则是文献[31]方法。此外,从客观评价指标来看,依据图像的不同,增强方法中的多尺度 Retinex 算法和复原方法中的文献[29]方法比同类的其他几种去雾算法能够得到更多的可见边。如果用平均梯度这一指标来衡量,则各算法的平均梯度的比值按递减的顺序依次为:文献[29]方法、文献[31]方法、多尺度 Retinex 算法、直方图均衡化算法、文献[27]方法、文献[30]方法和小波变换算法。而如果用去雾图像的黑色像素点所占图像大小的百分比来评估,则文献[31]方法和直方图均衡化算法的 $\sigma$ 值最小。从图 2 的视觉效果中也可以证

实以上规律,但不难发现文献[29]方法尽管 $e$ 和 $\bar{r}$ 值较大,其去雾图像的颜色却显得过于饱和,且有光晕伪影出现。相比之下,文献[31]方法结果自然,复原后图像的对比度、清晰度和颜色逼真度均要明显优于其他去雾方法,且无光晕伪影现象。数据库中其他图像的清晰化处理结果大多与该图具有相似的规律。



图 2 清晰化效果

4 结语

本文对图像去雾技术做了综述性的介绍。基于图像处理的图像增强方法具有对比度提高显著、图像细节突出、视觉效果明显的特点,该方法已经在实践中获得了广泛的应用。而基于物理模型的图像复原方法针对性强,得到的复原结果自然,且一般不会有信息损失,该技术必将获得更大的发展。尽管对图像去雾技术的研究已经取得了若干成果,但下述几点仍然有可能是今后研究的热点和难点问题,迫切需要引起研究人员的高度关注。

1) 考虑雾天图像的模糊信息。从图像处理学角度提出的增强方法和基于物理模型的复原方法虽然均能改善雾天降质图像的质量,然而这些方法都没有考虑到降质图像固有的模糊属性。景物由三维空间到二维图像的映射过程,必然会造成信息的大量丢失(如深度信息、被遮挡物体的信息);而且在有雾天气下,由于大气粒子的散射作用和粒子的自身成像,使得获取的图像对比度较低,边缘轮廓及景物的特征都比较模糊。因此,如何充分考虑降质图像的这些模糊信息,再结合大气散射的物理机制,从而更好地实现能见度的提高将是研究人员在今后相当长的一段时间内所面临的主要任务。

2) 对雾天视频进行去雾处理。雾天动态视频处理需要解决的首要问题是去雾算法的运行效率,以便满足实际应用的实时性要求。目前,已有研究者采用基于深度关系的图像复原方法对视频监控系统中的视频进行了去雾实验<sup>[25,28]</sup>。此外,已有雾天视频清晰化装置系统采用图像增强方法中的插值自适应直方图均衡化算法对雾天视频进行了清晰化处理。因此,研究高效的去雾算法处理雾天视频应该受到足够的重视。

3) 探索更完备的物理模型。基于物理模型的雾天图像复原算法已经取得了极大的进展,但是由于景物退化与场景深度呈非线性关系,由此带来的一个最大问题是很难保证所建立的景物退化模型的正确性和宽适性。目前,大多数的图像复原方法都建立在大气散射模型的基础上,并受到了此类模型的限制。即在某些天气情况下,使用该模型的复原方法将会失效。因此,采用更加完备的物理模型来描绘复杂的大气状况<sup>[38]</sup>,并探索研究基于这些模型的去雾算法在未来一段时间内都将是一个具有挑战性的课题。

4) 利用可编程图形硬件加速图像去雾算法。图像去雾任务本身通常含有大量复杂的数据处理算法,例如大型矩阵的分解,大规模方程组的求解以及众多的非线性优化问题,以往这些运算只能在CPU上进行,需要较长的处理时间,因而在某些对实时性要求高的场合无法达到预期的执行速度,所以利用可编程图形硬件加速图像去雾算法必然成为未来研究的一个热点。

#### 参考文献:

- [1] 詹翔,周焰. 一种基于局部方差的雾天图像增强算法[J]. 计算机应用,2007,27(2): 510-512.
- [2] 芮义斌,李鹏,孙锦涛,等. 一种交互式图像去雾方法[J]. 计算机应用,2006,26(11): 2733-2735.
- [3] 王萍,张春,罗颖昕. 一种雾天图像对比度增强的快速算法[J]. 计算机应用,2006,26(1): 152-154.
- [4] 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.
- [5] SEOW M-J, ASARI V K. Ratio rule and homomorphic filter for enhancement of digital colour image [J]. *Neurocomputing*, 2006, 69(7): 954-958.
- [6] RUSSO F. An image enhancement technique combining sharpening and noise reduction [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2002, 51(4): 824-828.
- [7] 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.
- [8] ERIKSSON B. Automatic image de-weathering using curvelet-based vanishing point detection [EB/OL]. [2010-01-20]. <http://homepages.cae.wisc.edu/~berikso/cs766.pdf>.
- [9] 董涛,董慧颖. 基于大气调制传递函数的天气退化图像复原方法研究[J]. 沈阳理工大学学报,2006,25(5): 39-42.
- [10] 王挥,刘晓阳. 利用大气调制传递函数复原天气退化图像[J]. 沈阳航空工业学院学报,2006,23(5): 94-96.
- [11] KIM T K, PAIK J K, KANG B S. Contrast enhancement system using spatially adaptive histogram equalization with temporal filtering [J]. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 1998, 44(1): 82-86.
- [12] STARK J A, FITZGERALD W J. An alternative algorithm for adaptive histogram equalization [J]. *Graphical Models and Image Processing*, 1996, 58(2): 180-185.
- [13] STARK J A. Adaptive image contrast enhancement using generalizations of histogram equalization [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2000, 9(5): 889-896.
- [14] 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.
- [15] ZIMMERMAN J B, PIZER S M. An evaluation of the effectiveness of adaptive histogram equalization for contrast enhancement [J]. *IEEE Transactions on Medical Imaging*, 1988, 7(4): 304-312.
- [16] 翟艺书,柳晓鸣,涂雅琰,等. 一种改进的雾天降质图像的清晰化算法[J]. 大连海事大学学报,2007,33(3): 55-58.
- [17] 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.
- [18] 翟艺书,柳晓鸣,涂雅琰. 基于模糊逻辑的雾天降质图像对比度增强算法[J]. 计算机应用,2008,28(3): 662-664.
- [19] OAKLY J P, SATHERLEY B L. Improving image quality in poor visibility conditions using model for degradation [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 1988, 7(2): 167-179.
- [20] NARASIMHAN S G, NAYAR S K. Chromatic framework for vision in bad weather [C]// *Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. New York, USA: [s. n.], 2000: 598-605.
- [21] NARASIMHAN S G, NAYAR S K. Vision and the atmosphere [J]. *International Journal of Computer Vision*, 2002, 48(3): 233-254.
- [22] SCHECHNER Y Y, NARASIMHAN S G, NAYAR S K. Polarization-based vision through haze [J]. *Applied Optics*, 2003, 42(3): 511-525.
- [23] SCHECHNER Y Y, NARASIMHAN S G, NAYAR S K. Instant dehazing of images using polarization [C]// *Proceedings of 2001 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2001: 325-332.
- [24] SHWARTZ S, NAMER E, SCHECHNER Y Y. Blind haze separation [C]// *Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2006: 1984-1991.
- [25] NARASIMHAN S G, NAYER S K. Contrast restoration of weather degraded images [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2003, 25(6): 713-724.
- [26] NARASIMHAN S G, NAYER S K. Interactive (De) weathering of an image using physical models [C]// *IEEE International Conference on Computer Vision Workshop on Color and Photometric Methods in Computer Vision*. New York, USA: [s. n.], 2003: 1-8.
- [27] KOPF J, NEUBERT B, CHEN B, *et al.* Deep photo: Model-based photograph enhancement and viewing [J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2008, 27(5): 116-1-116-10.
- [28] 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.
- [29] TAN R. Visibility in bad weather from a single image [C]// *Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2008: 2347-2354.
- [30] FATTAL R. Single image dehazing [J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2008, 27(3): 721-729.
- [31] HE KAIMING, SUN JIAN, TANG XIAOOU. Single image haze removal using dark channel prior [C]// *Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2009: 1956-1963.
- [32] WANG ZHOU, BOVIK A C, SHEIKH H R, *et al.* Image quality assessment: From error visibility to structural similarity [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2004, 13(4): 600-612.
- [33] HAUTIERE N, TAREL J-P, AUBERT D, *et al.* Blind contrast enhancement assessment by gradient ratioing at visible edges [J]. *Image Analysis and Stereology Journal*, 2008, 27(2): 87-95.
- [34] KOHLER R. A segmentation system based on thresholding [J]. *Computer Graphics and Image Processing*, 1981, 15(4): 319-338.
- [35] TAN R. Visibility in bad weather from a single image [EB/OL]. [2010-02-25]. <http://people.cs.uu.nl/robby/fog/index.html>.
- [36] FATTAL R. Single image dehazing [EB/OL]. [2010-02-25]. <http://www.cs.huji.ac.il/~raananf/projects/defog/index.html>.
- [37] HE KAIMING. Single image haze removal using dark channel prior [EB/OL]. [2010-02-25]. <http://personal.ie.cuhk.edu.hk/~hkm007/>.
- [38] PREETHAM A J, SHIRLEY P, SMITS B. A practical analytic model for daylight [C]// *Proceedings of the 26th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*. New York: ACM Press, 1999: 91-100.