

# 基于物理模型的单幅图像 去雾方法

王文成 著



科学出版社

# 基于物理模型的单幅图像 去雾方法

王文成 著

科学出版社

北 京

## 内 容 简 介

本书主要研究雾天图像的去雾方法及其相关应用,首先分析了图像增强、图像融合和图像复原方法;其次研究了基于线性变换的单幅图像去雾方法及针对大面积天空区域的去雾问题;最后提出了快速去雾方法,并探讨了大气光值获取的方法。

本书可供信息类、工程类、应用数学类专业的研究生以及图像处理领域的研究人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

基于物理模型的单幅图像去雾方法 / 王文成著. —北京:科学出版社, 2019.3

ISBN 978-7-03-060108-7

I. ①基… II. ①王… III. ①物理模型-应用-图象恢复法-研究  
IV. ①P23

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 288175 号

责任编辑:陈 婕 / 责任校对:郭瑞芝  
责任印制:吴兆东 / 封面设计:蓝正设计

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京九州迅驰传媒文化有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2019 年 3 月第 一 版 开本: B5(720 × 1000)

2019 年 3 月第一次印刷 印张: 10

字数: 200 000

定价: 88.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

# 前 言

图像去雾研究作为图像处理、模式识别、机器视觉等多学科交叉研究的热点,具有重要的理论意义和应用价值。图像去雾是通过一定的手段去除雾的干扰,以便得到满意的视觉效果并获取更多有效信息的处理技术。该项技术在户外视频监控、日常照片处理、航拍和 underwater 图像处理,以及现有汽车、船舶的安全辅助驾驶系统等诸多领域都有很广阔的应用前景。近几年来,国内外在该领域的研究得到了蓬勃发展并取得了显著成果,但仍有许多难点问题一直未得到很好的解决。

本书根据作者多年研究成果整理而成,主要介绍当前图像去雾技术的特点以及去雾质量评价的各种标准,提出基于线性变换的雾天图像复原方法,研究包含大面积天空区域图像的处理方法和面向视频处理的快速去雾方法,并设计了大气光值准确提取的策略。全书共 6 章:第 1 章主要介绍图像去雾问题的研究背景、意义和国内外研究现状,分析雾天图像的本质特征及图像去雾的关键问题;第 2 章主要介绍图像去雾效果的客观评价准则,并对各种去雾算法的效果分别采用不同的评价标准进行评价;第 3 章主要介绍一种基于线性变换的雾天图像复原方法;第 4 章主要研究包含大面积天空区域的图像去雾问题;第 5 章分析雾霾图像中天空区域的灰度特性,提出一种基于灰度投影的大气光值搜索算法;第 6 章基于大气散射理论和暗原色先验理论提出一种可用于实时运行场合的、基于单幅图像的快速去雾方法。

本书撰写的目的是将基于物理模型去雾的相关研究内容系统化,以便为初涉该领域的研究人员提供参考。书中所提出的算法已通过实验验证,在此基础上进一步的研究并加以完善,将可以不断优化图像去雾系统。

在撰写本书过程中,作者得到美国北得克萨斯大学袁晓辉博士、山东大学常发亮教授的指导和帮助,在此表示衷心的感谢!与本书内容相关的研究工作获得国家自然科学基金项目(61403283)、山东省自然科学基金项目(ZR2013FQ036)及潍坊学院“杰出青年”人才计划项目的资助,在此也表示感谢!

限于作者水平,书中难免存在不妥之处,欢迎专家、学者和广大读者批评指正。

# 目 录

## 前言

|                             |    |
|-----------------------------|----|
| 第 1 章 绪论 .....              | 1  |
| 1.1 去雾技术概述 .....            | 1  |
| 1.2 图像去雾方法的分类 .....         | 5  |
| 1.3 基于图像增强的方法 .....         | 6  |
| 1.3.1 直方图均衡化 .....          | 6  |
| 1.3.2 Retinex 方法 .....      | 8  |
| 1.3.3 频域滤波方法 .....          | 10 |
| 1.4 基于图像融合的方法 .....         | 12 |
| 1.4.1 基于多光谱图像的融合 .....      | 12 |
| 1.4.2 基于单幅图像分解的融合 .....     | 14 |
| 1.5 基于图像复原的方法 .....         | 15 |
| 1.5.1 基于附加信息的单幅图像去雾方法 ..... | 19 |
| 1.5.2 多幅图像去雾方法 .....        | 21 |
| 1.5.3 基于先验知识的去雾方法 .....     | 25 |
| 1.6 大气光值估计方法 .....          | 34 |
| 1.7 去雾技术的发展趋势 .....         | 35 |
| 第 2 章 图像去雾效果的评价方法 .....     | 39 |
| 2.1 主观评价 .....              | 39 |
| 2.2 客观评价 .....              | 40 |
| 2.2.1 非针对性去雾图像质量评价方法 .....  | 40 |
| 2.2.2 针对性去雾图像质量评价方法 .....   | 43 |
| 2.3 不同去雾方法比较 .....          | 46 |
| 第 3 章 基于线性变换的去雾方法 .....     | 51 |
| 3.1 快速去雾方法框架 .....          | 53 |
| 3.2 基于线性变换的透射率估计 .....      | 53 |
| 3.2.1 数学变换 .....            | 53 |
| 3.2.2 明亮区域的处理 .....         | 57 |
| 3.2.3 高斯模糊 .....            | 59 |

|       |                         |     |
|-------|-------------------------|-----|
| 3.3   | 大气光值估计 .....            | 62  |
| 3.4   | 图像复原 .....              | 65  |
| 3.5   | 实验结果分析 .....            | 66  |
| 3.5.1 | 主观定性评价 .....            | 67  |
| 3.5.2 | 客观定量评价 .....            | 71  |
| 3.5.3 | 运算复杂度 .....             | 75  |
| 3.6   | 结论 .....                | 77  |
| 第4章   | 大面积天空区域图像的去雾方法 .....    | 78  |
| 4.1   | 暗原色先验去雾原理 .....         | 80  |
| 4.2   | 暗原色先验存在的缺陷 .....        | 82  |
| 4.3   | 基于天空区域分割的方法 .....       | 84  |
| 4.3.1 | 天空区域分割 .....            | 84  |
| 4.3.2 | 大气光值估计 .....            | 89  |
| 4.3.3 | 透射率融合与细化 .....          | 89  |
| 4.3.4 | 图像恢复与色调调整 .....         | 93  |
| 4.4   | 实验结果分析 .....            | 96  |
| 4.4.1 | 主观定性评价 .....            | 97  |
| 4.4.2 | 客观定量评价 .....            | 101 |
| 4.4.3 | 运算复杂度 .....             | 102 |
| 4.4.4 | 浓雾图像实验结果 .....          | 102 |
| 4.5   | 结论 .....                | 103 |
| 第5章   | 一种基于灰度投影的大气光值获取方法 ..... | 104 |
| 5.1   | 当前的大气光值获取方法 .....       | 105 |
| 5.2   | 灰度积分投影 .....            | 106 |
| 5.2.1 | 方法论 .....               | 106 |
| 5.2.2 | 抗干扰能力分析 .....           | 108 |
| 5.3   | 大气光值估算方法 .....          | 109 |
| 5.4   | 实验结果分析 .....            | 112 |
| 5.4.1 | 精确度比较 .....             | 113 |
| 5.4.2 | 运算复杂度 .....             | 117 |
| 5.5   | 结论 .....                | 119 |
| 第6章   | 一种快速图像去雾方法 .....        | 120 |
| 6.1   | 快速去雾方法 .....            | 120 |
| 6.1.1 | 透射率估计 .....             | 121 |

---

|                       |     |
|-----------------------|-----|
| 6.1.2 大气光值估计 .....    | 123 |
| 6.1.3 透射率计算 .....     | 124 |
| 6.1.4 图像复原与色调调整 ..... | 126 |
| 6.2 方法描述 .....        | 127 |
| 6.3 实验结果分析 .....      | 128 |
| 6.3.1 主观评价 .....      | 130 |
| 6.3.2 客观定量评价 .....    | 133 |
| 6.3.3 运算复杂度 .....     | 134 |
| 6.4 结论 .....          | 137 |
| 参考文献 .....            | 138 |

# 第 1 章 绪 论

随着科技水平的日新月异和人工智能时代的到来，人们对信息的需求量越来越多。图像由于具有表示信息更容易被人们接受与理解的优势，已经成为人们了解外部世界的主要信息来源。

## 1.1 去雾技术概述

户外视觉系统广泛应用于视频监控、智能交通、遥感监测等领域，在人们的生产生活和军事领域中发挥着重要的作用。然而，天气的变化、汽车尾气的大量排放和工业污染的加重等原因使得人们的活动空间常常笼罩在雾霾之中。根据国家气象部门的数据，2016 年 3 月 13 日至 21 日，华北中南部、黄淮、江淮等地出现 2016 年来最长时间的一次雾霾灾害性天气，而此前仅在 2016 年元旦假期期间出现过；京津冀地区、华北、晋东南以及陕、甘部分地区遭遇中、重度雾霾天气，有些区域  $\text{PM}_{2.5}$  浓度指数超过  $300\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，冀南部分区域更是超过  $550\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，而且这种天气的发生范围和持续时间有一种愈演愈烈之势。

雾霾不仅直接危害居民身心健康，而且对社会生产、生活各个领域造成广泛影响。在雾霾天气下，户外视觉系统通常会因为受到大气中随机介质的散射作用而导致图像对比度和颜色发生改变，使得图像中蕴含的许多细节特征被衰减，极大地限制和影响了各种视觉系统效用的发挥。如图 1.1(a)所示公路图像监视系统，由于受到雾霾天气的影响，采集到的视觉信息不具有可辨识性，辅助或监控交通的能力大大削弱；如图 1.1(b)所示遥感航拍图像，由于受到大气随机介质的影响，遥感图像严重退化，对后续的信息处理产生很大的干扰。

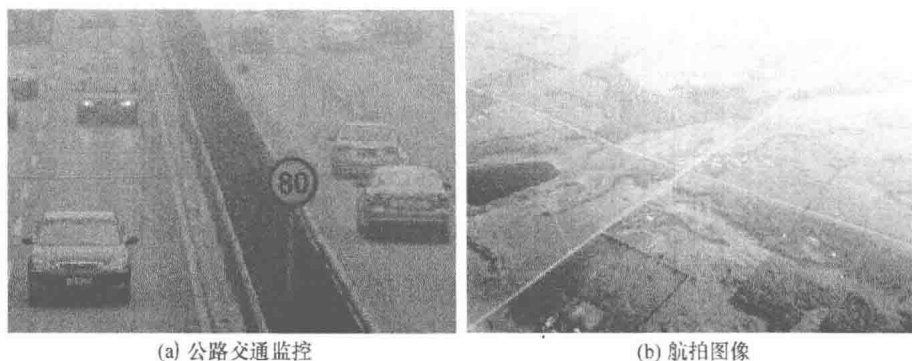


图 1.1 雾霾图像实例

图 1.2 为无雾场景、薄雾场景和浓雾场景下的三幅图像以及所对应的三色直方图。

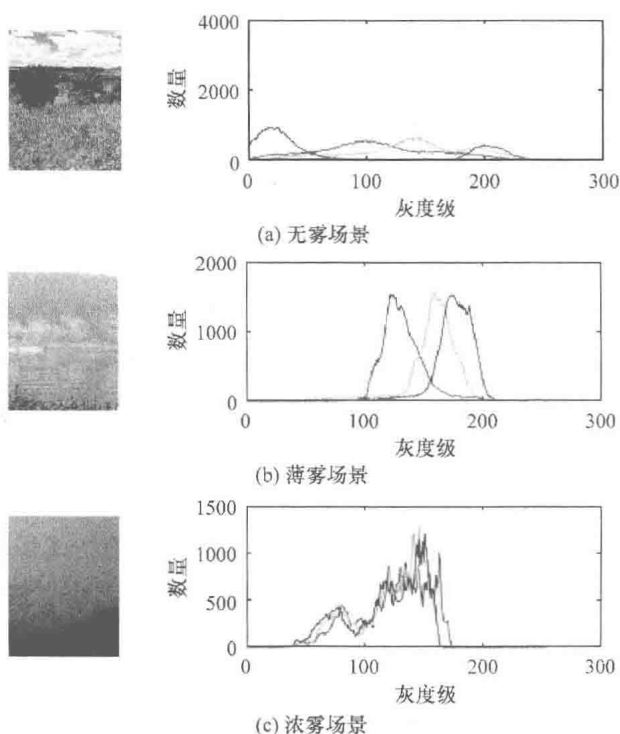


图 1.2 有雾和无雾图像像素值对比

由无雾场景、薄雾场景和浓雾场景所对应的直方图可以看出，无雾图像的灰度分布范围较大，说明图像中像素值的动态分布范围较大；有雾图像的

色彩值分布集中,并且随着雾浓度的增大,动态范围分布变窄,颜色衰减更严重。

因此,如何针对恶劣天气条件下的图像或者视频增强数据的有效性和可用性,简洁有效地复原清晰图像成为当前亟待解决的问题。这不但可以提高户外视觉系统的可靠性和鲁棒性,而且对促进图像信息挖掘理论的发展具有重要意义。其相关研究成果可广泛应用于城市交通<sup>[1-4]</sup>、户外视频监控<sup>[5-10]</sup>、卫星遥感监测<sup>[11-17]</sup>、车辆安全辅助驾驶<sup>[18-27]</sup>、军事航空侦查等领域,并且对水下图像分析<sup>[28-33]</sup>、雨雪图像清晰化<sup>[34-40]</sup>等诸多问题的研究具有参考价值。

去雾技术是通过一定的手段去除雾的干扰,以便得到满意的视觉效果并获取更多有效信息的处理技术。常用的去雾方法分为硬件去雾和软件去雾。硬件去雾方法主要是结合雷达等昂贵设备实现,是早期采用的方法。软件去雾方法主要通过增强图像完成,是图像处理领域的一个重要研究分支,因具有跨学科、前沿性以及应用前景广阔等特点而备受国内外大批研究者关注,近几年来已成为多学科交叉领域的研究热点。

图像去雾的研究工作最早可追溯到 20 世纪 50 年代,主要是美国学者针对地球资源卫星图像云雾退化问题而开展的工作。1992 年,加拿大研究机构 DREV(Defense Research Establishment Valcartier)的 Bissonnette 等针对雾和雨天下的图像进行去雾研究。随后,英国曼彻斯特大学的 Satherley 和 Oakley 等针对恶劣天气条件下的航拍降质彩色图像进行去雾处理。美国国家航空航天局(NASA)的 Langley 研究中心对在夜晚以及烟、雾条件下获取的图像基于 Retinex 方法进行增强,取得了较好的研究成果。以色列理工学院(Israel Institute of Technology)的 Schechner 和 Shwartz 基于偏振滤波的方法,建立了基于信号衰减和大气光影响的图像衰减模型。哥伦比亚大学计算机视觉实验室(Columbia University Computer Vision Lab)的 Nayar 和 Narasimhan 利用多帧对在雾天条件下拍摄的图像进行去雾处理,有效地增强了图像的对比度。康斯坦茨大学(University of Konstanz)的 Kopf 等通过获得场景的深度信息,实现了图像的去雾。英国 Dmist 公司基于曼彻斯特大学 SISP 研究组(Sensing, Imaging & Signal Processing Group)在图像对比度恢复方面的研究成果,设计出产品 ClearVue,该产品能够实现图像的清晰化,且实时性较好。特别值得一提的是,2009 年香港中文大学的何凯明博士提出了一种基于暗通道先验的单幅图像去雾方法,该成果在国际计算机视觉与模式识别会议(IEEE

Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, CVPR)上获得最佳论文奖,引起了该领域研究人员的高度关注。

近几年来,基于单幅图像的去雾方法发展迅速,有关此方向的论文数量不断增加,具体变化见图 1.3(显示 Google 搜索到的英文文献数量),其中 2000~2015 年发表的英文论文如图中灰色区域所示。以“去雾”作为篇名关键词所搜索得到的直接相关文献数量如图 1.4 所示。虽然以上文献不尽完整,但能够确定的是,关于图像去雾的研究近年来逐渐增多。

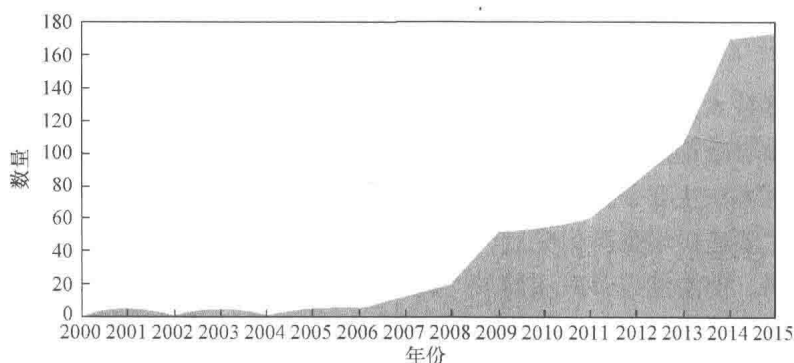


图 1.3 近几年相关英文论文发表统计图(Google)

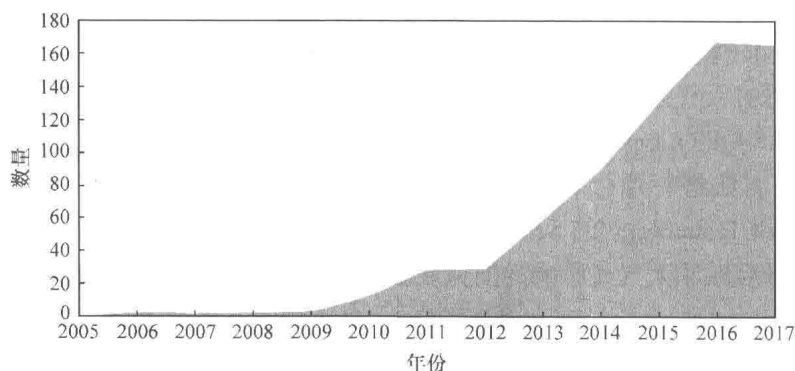


图 1.4 近几年相关英文论文发表统计图(CNKI)

总体而言,国内外研究人员对图像去雾技术的研究已经取得了若干成果,其有效性也在实际应用中得到一定的验证<sup>[41]</sup>,但该方向的研究时间并不长,这些研究成果和研究方法仍处于不断的发展中。

## 1.2 图像去雾方法的分类

目前对于雾天图像的处理方法主要分为三类：基于图像增强的方法、基于图像融合的方法和基于图像复原的方法。基于图像增强的方法不考虑图像退化原因，主要通过针对性的图像处理方法提高雾天图像的对比度和细节信息，改善图像的视觉效果，但该方法容易造成颜色等信息的损失，从而导致图像失真。基于图像融合的方法是在不需要物理模型的情况下，最大限度地利用多个源通道所采集到的关于同一目标的有用信息，经过图像处理和计算机技术最终形成高质量的图像。基于图像复原的方法主要研究雾天图像成像的物理机制，通过建立雾天退化模型，并补偿退化过程造成的失真，来获得未经干扰退化的无雾图像的最优估计值。这种方法以理论模型为依据，得到的去雾图像效果逼真自然，信息损失少，但是该类方法需要对模型中的参数进行有效估计。

以上三类又可以根据去雾方法的不同原理分为不同的子类，部分方法经过扩展可以用于视频去雾场景之中。基于图像增强的方法分为直方图均衡化、Retinex 方法、频域滤波(小波变换、曲波变换、同态滤波)。基于图像复原的方法则包括基于附加信息的单幅图像去雾、多幅图像去雾和基于先验知识的单幅图像去雾。具体的方法分类如图 1.5 所示。

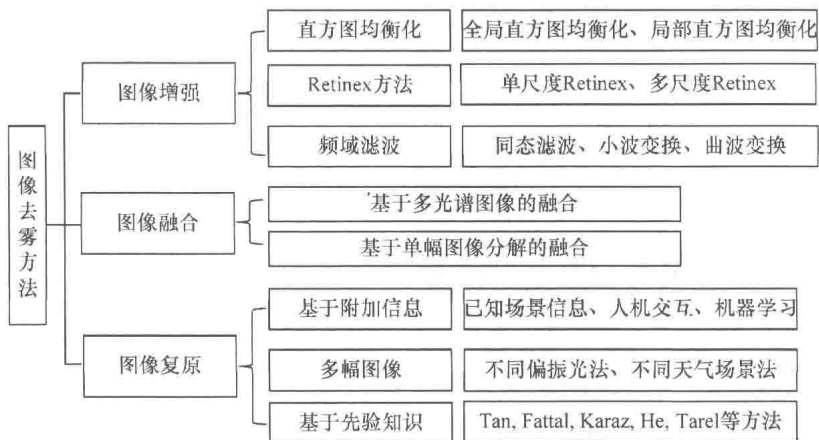


图 1.5 去雾方法分类框图

## 1.3 基于图像增强的方法

基于图像增强的去雾方法不要求解图像降质的物理模型,而是从人类视觉感受出发,通过直接增强图像对比度、修正图像色彩等方面改善图像质量,主要包括直方图均衡化方法、Retinex 方法、频域滤波方法。

### 1.3.1 直方图均衡化

直方图均衡化方法的思想源于对雾天图像的分析。雾天图像由于蒙上了一层“雾气”,其灰度值向一个范围内集中,对比度下降。采用直方图均衡化方法可使灰度值在整个灰度范围内均匀分布,获得更大的图像动态范围,提高图像对比度,增加灰度值的动态范围,从而达到增强雾天图像整体对比度的效果。直方图均衡化的例子如图 1.6 所示,其中图(a)为雾霾图像,图(b)为雾霾图像的灰度直方图,图(c)为直方图均衡化后的图像,图(d)为图(c)的灰度直方图。

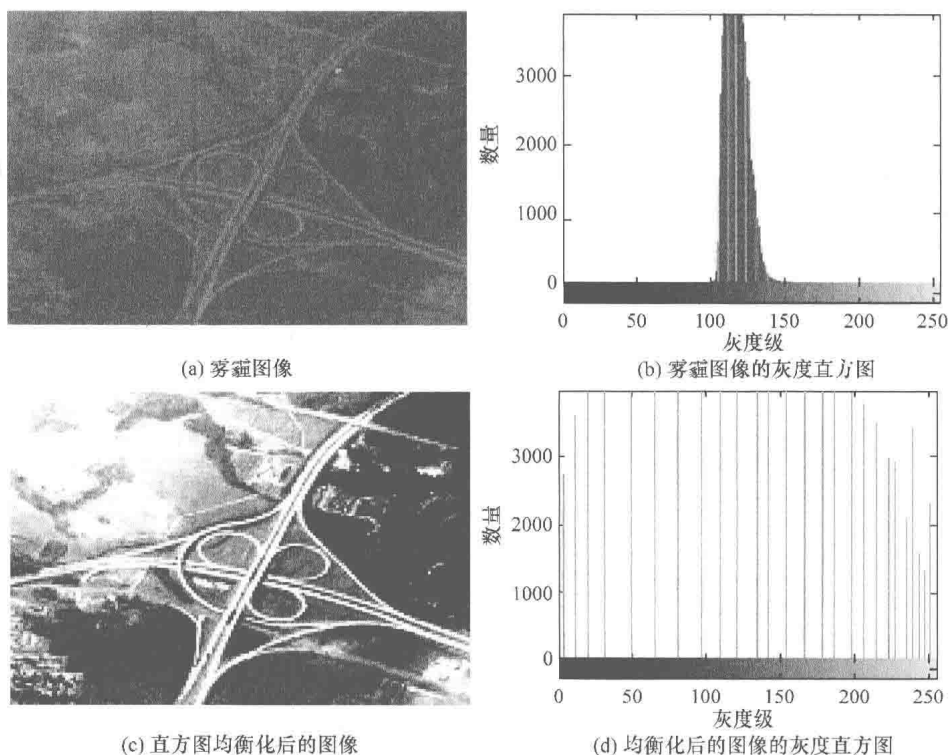


图 1.6 直方图均衡化

根据计算区域的不同,直方图均衡化方法又可以分为全局直方图均衡化(global histogram equalization, GHE)和局部直方图均衡化(local histogram equalization, LHE)。

全局直方图均衡化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。若用变量 $r$ 和 $s$ 分别表示原图和直方图均衡化后图像的灰度级,用 $P_r(r)$ 表示 $r$ 出现的概率, $L$ 表示灰度级总数, $n$ 表示图像中像素的总和, $n_j$ 表示 $j$ 灰度级像素的个数,则直方图均衡化可以用公式表示为

$$s = T(r) = \sum_{j=0}^k P_r(r_j) = \sum_{j=0}^k \frac{n_j}{n}, \quad k = 0, 1, 2, \dots, L-1 \quad (1.1)$$

全局直方图均衡化的优势是计算量小、效率高,特别适合于增强整体偏暗或偏亮的图像<sup>[42]</sup>,但是针对整幅图像进行灰度统计操作的全局方法很难使每个局部区域都得到复原的最优值,不能适应输入图像的局部亮度特性,且处理后图像的灰度层次感降低。因此,许多学者陆续提出了局部直方图均衡化方法来解决这一问题,该方法得到了广泛的应用。

局部直方图均衡化的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达到所需要的增强效果,适用于景深多变、对比度低的雾天图像增强处理,其缺点是存在局部块效应现象,而且计算量较大<sup>[43-45]</sup>。

随后,一些优化方法不断被提出,如文献[46]中提出了一种标准的自适应直方图均衡化方法(adaptive histogram equalization, AHE);文献[47]中采用了分块迭代直方图的方法来提高图像的对比度,同时利用移动模板对图像的每个不同部分进行部分重叠局部直方图均衡化(partially overlapped sub-block histograms, POSHE)处理。Huang等<sup>[48]</sup>提出了一种新颖的局部直方图均衡方法,该方法在保持亮度的同时提高了图像的对比度。Xu等<sup>[49]</sup>建立了一种将图像增强和白平衡相结合的广义均衡化模型,该模型在图像增强、白平衡和色调校正等方面具有良好性能。Wang等<sup>[50]</sup>采用直方图均衡化和小波变换(wavelet transform, WT)相结合的方法改善了图像的灰度分布,实现了图像增强。Xu等<sup>[51]</sup>提出了一种对比度限制自适应直方图均衡化(contrast limited adaptive histogram equalization, CLAHE)方法,该方法可以限制噪声,提高图像的对比度。文献[52]和文献[53]中分别将CLAHE方法、维纳滤波(Wiener filter, WF)与有限脉冲响应滤波器(finite impulse response filter, FIRF)相结合来提高图像的对比度。后来,科研人员又提出了插值直方图均衡化方法,即通过线性插值的方法求取当前像素点的变换函数,克服

了非重叠子块直方图均衡所引起的“块状效应”，取得了良好的增强效果。

总之，直方图均衡化方法对灰度图像处理效果不错，但是对于彩色图像的处理效果一般，而且会导致某些雾天退化图像噪声放大。

### 1.3.2 Retinex 方法

Retinex 方法来源于 Retinex 理论，即视网膜大脑皮层理论，它是 Land 和 McCann 从人眼对颜色的感知特性出发建立起来的，其实质就是从图像中抛开照射光的影响来获得物体的反射性质，是一种描述颜色不变性的模型<sup>[54,55]</sup>。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。依据照度-反射模型(如图 1.7 所示)，一幅图像可表示为反射分量和照度分量乘积的形式：

$$F(x, y) = R(x, y)I(x, y) \quad (1.2)$$

其中， $R(x, y)$  表示反射分量，代表物体表面的反射特性； $I(x, y)$  表示照度分量，取决于环境光照特性； $F(x, y)$  是被接收的图像。 $I(x, y)$  决定图像的动态范围， $R(x, y)$  决定图像的内在性质。基于 Retinex 理论，如果可以找到方法从  $F(x, y)$  中估计出  $I(x, y)$ ，把反射分量从光照总量中分离出来，就能够降低入射分量对图像的影响，从而达到增强图像的目的。Retinex 方法具有锐化、颜色恒常性、动态范围压缩大、色彩保真度高等特点，其一般处理过程如图 1.8 所示，图中 Log 为对数运算，Exp 为指数运算， $f(x, y)$  为  $F(x, y)$  的对数运算结果， $i(x, y)$  为  $I(x, y)$  的对数运算结果， $r(x, y)$  为  $f(x, y)$  和  $i(x, y)$  的差值。

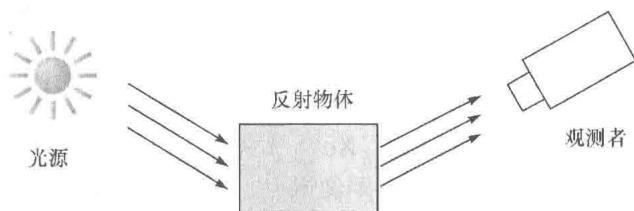


图 1.7 光照反射模型

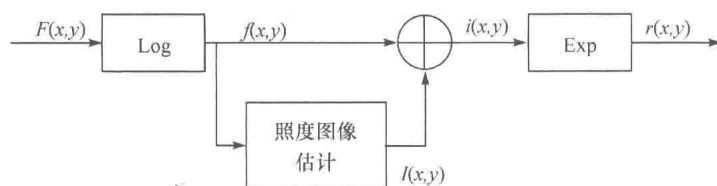


图 1.8 Retinex 方法的一般处理过程

目前基于 Retinex 理论的主要方法有单尺度 Retinex(single scale Retinex, SSR)方法、多尺度 Retinex(multiple scale Retinex, MSR)方法,可用于对有雾图像进行增强处理。

SSR 方法<sup>[56]</sup>是 Jobson 等基于中心/环绕 Retinex 提出的,这种方法的本质是估计出环境亮度后计算得到反射图像。为了在动态范围的压缩和颜色恒常性之间达到很好的平衡,Jobson 等<sup>[57]</sup>又把单尺度方法扩展到多尺度,提出了 MSR 方法。由于反射图像基本不依赖于照度分量,所以可消除雾的影响。其对应原理的表达式如下:

$$r_i(x, y) = \log R_i(x, y) = \log F_i(x, y) - \log[G(x, y) * F_i(x, y)] \quad (1.3)$$

$$r_{\text{MSR}i}(x, y) = \log R_i(x, y) = \sum_{k=1}^N w_k \{ \log F_i(x, y) - \log[G_k(x, y) * F_i(x, y)] \} \quad (1.4)$$

式中,  $F_i(x, y)$  表示输入图像;  $r_i(x, y)$  表示 Retinex 的输出;  $R_i(x, y)$  为反射图像;  $i$  表示不同的颜色通道;  $(x, y)$  为图像中像素的位置;  $*$  为卷积运算符;  $N$  表示尺度的数量,一般情况下为 3;  $w_k$  表示加权系数;  $G(x, y) = e^{-(x^2+y^2)/c^2}$  为低通卷积环绕函数,  $c$  为高斯环绕尺度。

该方法融合了高斯函数与原图像进行卷积的优点,通过大、中、小三个尺度特征实现了动态范围压缩和颜色恒常,达到了较为理想的视觉效果。

然而,由于高斯滤波不具有良好的边缘保持性能,去雾后的图像中会存在边缘退化现象和光晕效应,影响了整体效果。为了尽可能减少这些影响, Xu 等<sup>[58]</sup>设计了一种均值漂移平滑滤波器(mean shift smoothing filter),用于克服光照不均匀的问题并消除光晕现象。Yang 等<sup>[59]</sup>设计了一种自适应滤波器(adaptive filter),通过结合子块的局部信息来估计照度分量。Hu 等<sup>[60]</sup>用双边滤波代替高斯滤波估计照度分量。在文献[61]中,一种新的多尺度 Retinex 彩色图像增强方法被提出,该方法根据当前位置的梯度方向确定高斯滤波器的长轴方向,可以在增强对比度的同时更好地保留原图像的颜色信息。Shu 等<sup>[62]</sup>也提出了一种基于子带分解(sub-band decomposition)的 MSR 图像增强方法。Fu 等<sup>[33]</sup>提出了一种 Retinex 变化框架,通过分解、增强和重组方法处理单幅水下图像的反射和光照信息。Zhang 等<sup>[63]</sup>采用一种改进的 Retinex 方法处理交通视频去雾,实验结果表明,该方法不仅可以去雾,而且可以提高交通视频图像的清晰度。此外,有研究者将 Retinex 变换与其他图像增强技术结合起来,通过对 Retinex 变换后的图像再次进行直方图均衡化或灰度拉伸处理以达到增强图像效果的目的。

Retinex 方法的优点是物理意义清楚, 容易实现, 不仅可以增加图像的对比度和明亮度, 还可以缩小过大的灰度动态范围; 同时不受光照非均衡性影响, 可以增强亮暗区域的图像细节, 对于彩色图像的增强和去雾处理有明显的优越性。但是, 该方法利用高斯卷积模板进行照度分量估计, 不具备边界保持能力, 导致在像素值变化剧烈的边界区域, 反射图像会产生光晕现象。MSR 方法对于原图像偏向于某种色调的情况处理效果不够理想, 处理后的图像对比度减小, 整体偏亮。

### 1.3.3 频域滤波方法

在雾天条件下, 图像中的低频分量得到增强, 因此可以用滤波的方法, 用高通滤波器对图像进行滤波, 达到抑制低频、增强高频的目的。基于频域的图像增强方法是借助傅里叶分析等变换手段, 将图像转换成频域进行滤波操作, 再将其反变换到空间域。典型的基于频域的方法包括同态滤波、小波变换、曲波变换。

#### 1) 同态滤波

图像由照射分量和反射分量两部分组成, 雾气对应的照射分量以空间缓慢变化为特征, 而反射分量往往是景物中细节引起的突变, 即照度与低频分量相联系, 反射与高频分量相联系。滤除照度分量, 便可以达到图像增强的目的。同态滤波结合频率过滤和灰度变换, 利用压缩图像动态范围和增强对比度来改善图像的质量。

利用同态滤波的方法实现图像去雾的基本原理以照明-反射模型为基础, 其具体流程如图 1.9 所示。图中, Log 为对数变换, FFT 为快速傅里叶变换,  $H(u,v)$  为频率滤波函数, IFFT 为快速傅里叶逆变换, Exp 为指数运算。

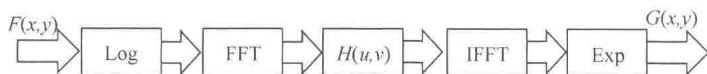


图 1.9 同态滤波流程图

Seow 等<sup>[64]</sup>利用同态滤波方法对彩色图像进行去雾处理, 得到了很好的增强图像效果。Cai 等<sup>[65]</sup>提出了一种自适应同态滤波方法(self-adaptive homomorphic filtering), 并将其用于去除图像中小的云朵。