doi:10.3969/j.issn.1006-8023.2022.04.013

针对森林背景的去雾图像优化

孟宇彤1,赵康军2,赵伟1*

(1. 东北林业大学信息与计算机工程学院,哈尔滨150040;2. 临沭县工业和信息化产业发展中心,山东临沂276700)

摘 要:森林雾天常导致采集的图像信息质量差,为得到更为清晰完整的森林去雾图像,从而为森林监测提供更好的数据支持和保障,该文利用自适应性算法初步确定森林雾气含量以及光线强度等环境状况,再用亮暗通道融合算法对全局大气光、透射率等大气模型的重要参数值进行优化,最后针对亮暗通道先验算法造成的晕轮效应进行高斯曲率滤波处理。基于自适应图像增强的亮暗通道融合去雾算法能有效改善森林图像的质量,得到细节丰富、视觉效果清晰的森林去雾图像。实验分别从主观标准和客观标准对图像效果进行科学性评价,所得到的融合改进算法对森林图像优化有良好的效果。

关键词:森林图像优化;自适应;图像去雾;亮暗通道融合;高斯曲率滤波

中图分类号:S762.2;TP391.41 文献标识码:A 文章编号:1006-8023(2022)04-0106-07

Defogging Image Optimization for Forest Background

MENG Yutong¹, ZHAO Kangjun², ZHAO Wei^{1*}

College of Information and Computer Engineering, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China;
 Linshu Industrial and Information Industry Development Center, Linyi 276700, China)

Abstract: Forest fog often leads to poor quality of collceted image information. In order to obtain clearer and complete images of forest defogging images and provide better data support and guarantee for forest monitoring, adaptive algorithm is used to preliminarily determine the forest fog content, light intensity and other environmental conditions. Then, the light and dark channel fusion algorithm is used to optimize the global atmospheric light, transimittance and other important parameters of the atmospheric model. Finally, Gaussian curvature filtering is used to deal with the halo effect caused by the light and dark channel prior algorithm. Light and dark

channel fusion defogging algorithm based on adaptive image enhancement can effectively improve the quality of forest images, and obtain clear and complete forest defogging images with rich details and clear visual effects. The experiment evaluates the image effect scientifically from subjective standard and objective standard respetively, and the fusion improved algorithm obtained has good effect on forest image optimization.

Keywords: Forest image optimization; self-adaption; image defogging; light and dark channel fusion; Gaussian curvature filtering

0 引言

森林是国家的重要资源,对森林进行智能化监控非常重要。气象学定义,大气中因悬浮的水汽凝结,能见度低于1000 m的天气现象为雾^[1]。在深秋和初冬,因清晨气温低且植物呼吸作用达到顶峰,水汽易凝结,导致雾的形成。大雾反射大量太

基金项目:国家自然科学基金项目(61975028);黑龙江省重点研发计划(GZ20210017);黑龙江省重点研发计划(GZ20210018)

第一作者简介:孟宇彤,硕士研究生。研究方向为信号与信息处 理。E-mail: 2140309968@qq. com

*通信作者:赵伟,博士,教授。研究方向为数字信号处理、图像 处理等。E-mail: 469190296@ qq. com

引文格式:孟宇彤,赵康军,赵伟.针对森林背景的去雾图像优化 [J].森林工程,2022,38(4):106-112.

MENG Y T, ZHAO K J, ZHAO W. Defogging image optimization for forest background[J]. Forest Engineering, 2022,38(4):106-112. 阳辐射,使森林能见度下降,对现有的森林实时监测管理造成干扰阻碍,因此设计一种优化的全天候 去雾算法尤为重要。

就国内外研究现状而言,图像去雾算法主要分为3类:一是基于数字图像处理技术中图像增强的 去雾方法,主要包括空域和频域的增强算法,如 Retinex 算法^[2-4]、均衡化算法、双边滤波方法^[5]和高斯 滤波^[6]等,该类算法虽然可以明显提升对比度、去 除噪点、还原图像的视觉效果,但却忽略了雾天图 像降质机理,无法从本质上解决问题,使得图像去 雾的效果有限,也造成了还原的图片不真实问题。 二是基于物理模型的去雾方法^[7],主要有基于暗通 道先验的去雾算法^[8]、区域分割方法^[9]和基于暗通 道融合亮通道优化方法^[10]等。He 等^[11]统计分析 了大量户外无雾图像,通过构建雾化图像的物理模 型得出暗通道先验理论,该理论能够恢复出较为清 晰完整地去雾图像,但该类算法的缺点是在不满足

收稿日期:2021-11-23

暗通道先验理论的天空区域会产生严重的颜色畸 变。对此许多学者在暗通道先验算法基础上提出 了改进措施:Yan 等^[9]通过边缘检测的方法分离得 到天空区域,并将其提取出来进行先验处理,这种算 法的缺点是在图像像素变化剧烈的边缘处会出现光 晕效应且伴随色彩失真,恢复出的图像在边界处存在 光晕和伪影;李鹏飞等^[10]提出了使用暗通道和亮通 道结合的方法来进行图像去雾;蒯峰阳等^[12]在亮暗 通道融合算法的基础上通过大量实验优化了大气光 的强度值,在户外去雾方面取得了较为理想的效果, 但在森林图像去雾方面存在局限性。三是基于深度 学习的去雾算法^[13],通过庞大的数据库训练模型,进 而对输入的测试图像进行处理,这类算法的缺点是需 要大量的数据集进行训练和测试,但目前图像数据集 有限,并且合成的去雾图像和实际图像仍有所差别。

1 森林背景图像去雾的优化

本研究先采用自适应算法对图片的亮度进行计 算并根据需要进行亮度调整,然后在亮暗通道去雾的 物理模型基础上,针对森林的空气湿度等特殊条件, 对空气中的大气光、透射率等参数进行优化,后续进 行高斯曲率滤波去除光晕效应,利用图像增强和大气 介质成像模型的优势改进得到更为清晰完整的森林 去雾图像,从而为森林监测提供更好的数据支持和保 障。设计的去雾图像处理流程如图1所示。



图 1 设计的去雾图像处理的流程图

Fig. 1 The flow chart of defogging image processing

1.1 自适应算法预处理

在容易产生浓雾的深秋和初冬森林环境中,图 像的色彩度相对单一,多为黑色、褐色、暗绿色以及 白雾色,树木枝干缝隙狭小导致光照不足,采集到 的图像质量较差,如图2所示。



图 2 雾天森林图像

Fig. 2 Forest images on foggy days

因此采用自适应算法对图像进行预处理。将 输入图像 HSV(Hue Saturation Value)颜色空间的明 亮度进行压缩,用像素点亮度值和图像最大亮度值 分别除以对数平均亮度,如公式(1)

$$I_{g}(x,y) = \frac{\log\left(\frac{I_{w}(x,y)}{\bar{I_{w}}} + 1\right)}{\log\left(\frac{I_{wmax}}{\bar{I_{w}}} + 1\right)}$$
(1)

式中: $I_{g}(x,y)$ 表示经明亮度压缩后的输出结果; $I_{w}(x,y)$ 表示输入图像像素点亮度值; I_{wmax} 表示输 入图像明亮度对应的最大值; *I*_w表示输入图像的对数平均亮度值。

$$\bar{I}_{w} = e^{\frac{1}{N}} \sum (x, y) \log(\delta + I_{w}(x, y)) \circ (2)$$

式中:N表示像素总数;δ是一个很小的值,用于避 免对纯黑色像素进行对数计算时数值溢出^[14]。

公式(1)表明,当对数平均亮度向高值收敛时, 对数函数的形状收敛为线性函数。可见,低明亮度 的场景比高明亮度的场景得到更多的提升。根据场 景的对数平均明亮度能使场景整体明亮度充分压缩。 在每个像素点亮度值应用对数平均运算得到 对比度鲜明的图像后,将原输入图像的明亮度均值 作为阈值,用对数平均亮度值*I*_w与阈值进行比较: 若*I*_w大于该图像的阈值则判定为属于白天图像,不 进行光照增强,直接进行去雾算法处理;若*I*_w小于 阈值则首先进行局部亮度增强^[15],后续用优化的亮 暗通道先验去雾算法的处理。

1.2 自适应局部亮度增强算法 (Adaptive Local Tone Mapping, ALTM)

在自适应算法预处理部分,已经对图像的全局 亮度值进行调整; *I*_w小于阈值的图像称为低明亮度 图像,对此类图像进行局部亮度增强,将根据公式 (3)进行处理

$$I_{\text{out}}(x,y) = \left(\left(1 + \frac{I_{g}(x,y)}{I_{\text{gmax}}}\right) + \log\left(\frac{I_{g}(x,y)}{R_{g}(x,y)} + \lambda \bar{I_{g}}(x,y)\right) \right)_{\circ}$$
(3)

式中: $I_{out}(x,y)$ 为亮度增强处理后的输出结果; $I_g(x,y)$ 为预处理时全局自适应输出值(与公式(1) 中的意义相同); I_{gmax} 为预处理图像中的最大明亮度 值; λ 为非线性控制参数,用于调节自适应非线性偏 移量; $I_g(x,y)$ 为预处理图像的对数平均亮度值; $R_g(x,y)$ 是以像素点(x,y) 为中心、r 个像素点值为半 径所组成的正方形像素块经滑动处理后的输出, $R_g(x,y)$ 为对 $I_g(x,y)$ 进行滤波操作,滤波算法为

$$R_{g}(x,y) = \frac{1}{|\Omega|} \sum_{(\xi_{x},\xi_{y}) \in \Omega(x,y)} \left(a(\xi_{x},\xi_{y}) I_{g}(x,y) + b(\xi_{x},\xi_{y}) \right)_{\circ} (4)$$

式中: $|\Omega|$ 为图像中的正方形像素块的个数; $\Omega(x, y)$ 表示正方形像素块的区域; (ξ_x, ξ_y) 为 $\Omega(x, y)$ 区域内临近像素点(x,y)的像素点坐标; $a(\xi_x, \xi_y)$ 和 $b(\xi_x, \xi_y)$ 为线性系数,满足公式(5)和公式(6)。

$$a(\xi_{x},\xi_{y}) = \frac{\mu_{2}(\xi_{x},\xi_{y}) - \mu^{2}(\xi_{x},\xi_{y})}{\sigma^{2}(\xi_{x},\xi_{y})} \circ$$
(5)

 $b(\xi_x,\xi_y) = \mu(\xi_x,\xi_y) - a(\xi_x,\xi_y)\mu(\xi_x,\xi_y)$ 。(6) 式中: $\mu(\xi_x,\xi_y)$ 与 $\sigma(\xi_x,\xi_y)$ 分别为预处理图像 I_g 在 $\Omega(x,y)$ 区域的像素块均值和方差; $\mu_2(\xi_x,\xi_y)$ 是在 $\Omega(x,y)$ 区域内 I_g 平方的均值。

在经过图像局部像素亮度值调整和滤波优化 后,能够实现高动态范围的图像自适应增强。实验 证实,经过光照增强的夜晚森林去雾图要比直接去 雾的森林夜晚图效果好得多,实验结果如图3所示。



图 3 自适应算法增强效果图

Fig. 3 Adaptive algorithm enhancement image

1.3 亮暗通道融合算法

暗通道先验算法是一种基于物理模型的去雾 方法,在确定雾化图像模型的基础上完成降质图像 的恢复工作。本研究在暗通道的基础上进行改进, 以达到更好的去雾效果。

在计算机视觉领域,雾化图像的表示通常见公 式(7)。

 $I_{out}(x,y) = J(x,y)t(x,y) + A[1 - t(x,y)]$ 。 (7) 式中:J(x,y)为无雾情况的场景色彩信息;t(x,y)为 有雾情况的透射率;A为全局大气光,与场景辐射的 衰减有关,通常用常数来表示。去雾模型是根据A为主要光源场景的假设,无雾场景J(x,y)可以表 示为

$$J(x,y) = \frac{I_{out}(x,y) - A}{t(x,y)} + A_{\circ}$$
(8)

He 等^[11]通过统计分析大量的户外无雾图像得 到统计经验:在无雾情况下,彩色图像分解成的 *R*、 G XB 三通道中, 总会有至少1个通道色彩强度较小, $表示为 <math>J^{dark}$,并且 $J^{dark} \rightarrow 0$,对于任意图像 J,暗通道 $J^{dark}(x, \gamma)$ 满足

 $J^{\text{dark}}(x,y) = \min_{x,y \in \Omega(x,y)} (\min_{c \in \{R,G,B\}} J^{c}(x,y))_{\circ}$ (9) 式中: $\min_{c \in \{R,G,B\}} J^{c}(x,y)$ 表示在像素点 (x,y)的 $R \setminus G \setminus B$ 通道中取色彩强度最小值; c 表示图像 $R \setminus G \setminus B$ 三通道中的某一通道; $\min_{x,y \in \Omega(x,y)}$ 表示取以(x, y)为中心的局部方块内色彩强度最小值; 2 个取最 小值的算子顺序可以进行交换。

Yan 等^[9] 通过对室外朦胧图像的统计发现:在最 模糊的图像块包含的像素在至少 1 个通道中表现出 非常明亮的色彩强度。对任意图像 J,亮通道显示为 $J^{\text{light}}(x,y) = \max_{x,y \in \Omega(x,y)} (\max_{c \in \{R,G,B\}} J^{c}(x,y))$ 。 (10)

像素点处的亮通道强度趋于无雾图像的大气光 强度,即 $J^{\text{light}} \rightarrow A^{\text{light}}$ 。 $\Omega(x,y)$ 是以(x,y)为中心的局 部方块, max_{x,y \in \Omega(x,y)}为 Ω 区域内色彩强度最大值。 由上可知,有雾图像在非天空区域的暗通道强 度趋于零,亮通道强度趋于无雾时大气光强度。蒯 峰阳等^[12]利用亮暗通道的算法,得出图像亮通道的 大气光值为*A*^{light},将暗通道先验估计的大气光值记 作*A*^{dark},将*A*^{light}和*A*^{dark}以3:1的权重进行加法运 算,最终得到亮暗通道融合算法估计的大气光强度 数值。亮暗通道共同估计大气光的实质是对暗通 道先验估计出的全局大气光进行逐点修正。这一 修正过程避免了使用同一常数值进行去雾的不准 确性,提高了图像去雾的可靠性。

去除雾霾的过程是从已知图像 I 的亮度中恢复 出无雾图片 J、全球大气光 A 和透射率。将公式(9) 的近似值 $J^{dark}(x,y) \rightarrow 0$ 代入公式(8),可得透射率 近似值 $\tilde{t}(x,y)$ 为

$$\widetilde{t}(x,y) = 1 - w \min_{x,y \in \Omega(x,y)} \left(\min \left(\frac{I_{out}^c(x,y)}{A} \right) \right) \quad (11)$$

式中: $\tilde{t}(x,y)$ 为透射率的近似估计值; $\Gamma_{out}(x,y)$ 为 有雾图像在某通道内的色彩强度最小值;w为引入 的 0~1 常量,用于控制去雾程度,w越大,去雾效果 越明显,但因 Halo(晕轮)效应导致的图像失真情况 也更严重,因此保留适当的雾气能使图像更接近真实 值,经过数据验证,w取值为0.91时最接近无雾时的森林真实图像,表1为不同去雾程度的图像信息熵。

表1 透射率与信息熵的关系

Tab. 1 Relationship between transmittance rate and information entropy

森林图像 Forest image	信息熵(w) Information entropy							
	0.85	0.87	0.89	0. 91	0.93	0.95		
森林图像 1 Forest image 1	6.0090	6.0722	6.0995	6. 149 5	6.1264	6.040 8		
森林图像 2 Forest image 2	7.433 6	7.5043	7.5269	7.5591	7.5444	7.422 2		
森林图像 3 Forest image 3	5.9216	6.0116	6.0247	6. 103 9	6.065 1	5.9707		
森林图像 4 Forest image 4	7.735 1	7.7362	7.737 0	7.7379	7.7374	7.736 0		
森林图像 5 Forest image 5	7.0014	7.017 2	7.025 3	7.0407	7.0327	7.009 3		

在用亮暗通道融合算法估计大气光值以及根 据实验得出适合森林环境的去雾参数后,得到图像 如图 4 所示。从图 4 可以看出,图像光线变亮,树木 的枝叶清晰可见,图像对比度也明显提高。此时去 雾效果较理想,但树木的尖端边缘存在光晕,也说 明去除 Halo 效应十分必要。





Fig. 4 Defogging image of light and dark channel fusion algorithm

2 Halo 光晕效应的优化

经亮暗通道融合去雾算法对透射率、全局大气 光等参数进行优化,森林雾气图像得到较好地恢 复,但亮暗通道融合去雾算法造成图像的 Halo 光晕 效应无法避免。Halo 效应会让图像中介于天空和 森林间的分界线过于明显,造成图像不真实感。

针对亮暗通道去雾算法出现的 Halo 光晕效应, 本研究采用高斯曲率滤波对 Halo 光晕进行边界模 糊处理,使光晕变得不明显,图像更趋近于真实。

2.1 高斯曲率滤波

曲率滤波是一种从微分几何的角度最小化相 关曲率以实现图像优化的方法。Lee 等^[16]提出,高 斯曲率是图像信号的固有性质,因此可以根据性质 构造高斯曲率滤波器来优化图像。Gong^[17]根据图 像信号的高斯曲率,设计了高斯曲率滤波的优化解 法,既避免了求解高斯曲率的二阶偏导,又能保持 图像的梯度和边缘细节信息。该理论假设理想无 噪图像所构成的曲面是分块可展的,根据微分几 何^[18-19]等知识已知一个曲面是可展曲面当且仅当 高斯曲率为0。

在森林图像 Halo 效应的处理上,本算法使高斯 曲率最小化,以此达到去除图像上的光晕噪点、平 滑图像的目的。设J经去雾处理后转化为确定的离 散数字图像,U表示需要估计的输出图像。将图像 解释为数据空间上的一个几何曲面,利用高斯曲率 作为约束重建细节和边缘平滑的未知图像。

2.2 域分解求解过程

域分解^[20]求解过程是通过调整各点像素值使 其位于邻域像素的切平面上来满足可展条件。求 解采用最小距离调整原则:对于(*i*,*j*)坐标的像素 点,首先将空间进行分解从而去除邻域像素之间的 关联性,使二维图像中的像素点分成水平方向和垂 直方向上的同类像素均不相邻;其次计算像素点(*i*, j)与 3×3 窗口内的邻域像素构成的三角切平面的距离,由于像素点到三角切平面的投影有 8 种,即有 8 种投影距离,三角切平面的情况如图 5 所示;最后将 8 种投影距离的最小值作为投影算子对当前像素值 进行修正。8 种投影距离的求解方法为

$$\begin{split} &d_1 = (U(i-1,j) + U(i+1,j))/2 - U(i,j) \\ &d_2 = (U(i,j-1) + U(i,j+1))/2 - U(i,j) \\ &d_3 = (U(i-1,j-1) + U(i+1,j+1))/2 - U(i,j) \\ &d_4 = (U(i-1,j+1) + U(i+1,j-1))/2 - U(i,j) \\ &d_5 = U(i-1,j) + U(i,j-1) - U(i-1,j-1) - U(i,j) \\ &d_6 = U(i-1,j) + U(i,j+1) - U(i-1,j+1) - U(i,j) \\ &d_7 = U(i,j-1) + U(i+1,j) - U(i+1,j-1) - U(i,j) \\ &d_8 = U(i,j+1) + U(i+1,j) - U(i+1,j+1) - U(i,j) \\ &|d_m| = \min\{|d_i|, i=1,2,\cdots,8\} \end{split}$$

U(i,j)=U(i,j)+d_m。
 式中:U(i,j)表示(i,j)坐标处的输出像素值;d_i
 (i=1,2,3,...,8)表示曲面上(i,j)点与不同邻域
 点所在切平面的距离,在此过程中寻找最小 |d_i|,

即高斯滤波曲率,采用滑动窗口对整幅图像进行滤 波操作即可得到平滑后的目标图像;d_m为寻找到的 最小距离。



Fig. 5 Types of triangular tangent planes in Gaussian curvature filtering optimization

3 结果和分析

为验证改进算法的去雾效果,该研究在 Matlab2015b 软件、Windows 10 环境下进行了一系列仿 真,将本研究优化算法与 ALTM 算法、暗通道先验算 法、亮暗通道结合去雾算法、自适应直方图均衡化 算法等进行比较,通过图像性能评价指标对图像进 行质量评估,各算法去雾效果图如图 6 所示。



从仿真结果中看出,改进算法对白天和夜晚的 除雾效果均相对理想,以第1组图像为例,暗通道先 验算法中树的尖端相对模糊,后在亮暗通道融合算 法中很好地补充了尖端的部分信息,完善图像内 容。从第5列图像可以看出高斯滤波算法能够解决 光晕效应,第6列图像说明融合算法既去除了光晕 又保留了完善的细节信息。 等细节信息比较重要,方差能够反映图像增强后细节信息的丰富度,对比度可以反映图像色彩的鲜明程度,平均梯度则反映图像中灰度值变化的剧烈程度。为更客观地评价本研究的改进算法,验证其有效性,采用比较方差、对比度、平均梯度和结构相似度等指标,准确地说明优化算法比其他算法的优势,结果见表2。

从客观评价维度来看,树种的颜色、形状轮廓

rab. 2 Comparison of evaluation indexes of different delogging algorithm										
评价指标 Evaluation index	(a)原图 (a)Original image	(b)ALTM 处理 (b)ALTM	(c)暗通道先验 (c) DCP	(d)亮暗通道结合 (d) DBCP	(e)直方图均衡化 (e) AHE	(f)改进算法 (f) Improved algorithm				
方差 Variance	7 021.63	4 948.91	9 019.84	9 454.16	8 878.55	10 052.41				
	2 902.12	2 720.44	3 489.69	3 634.63	3 551.71	3 773.16				
	1 182.39	4 103.81	1 115.26	1 191.22	1 139.89	1 852.64				
	3 826.66	4 579.83	3 593.87	3 607.81	3 616. 19	3 898.38				
	2 133.27	2 437.44	2 284.54	2 425.70	2 329.22	2 464.43				
对比度 Contrast	31.43	51.96	121.44	160. 91	166.04	189. 52				
	237.91	220.28	370.67	411.61	513.34	533.66				
	3.02	25.44	9.84	56.01	13.99	70.31				
	352.76	400.54	539.52	807.43	655.57	996.58				
	85.82	158.33	109.52	123.72	117.86	134.36				
平均梯度 Average gradient	2. 22	1.57	3.85	4.49	4.22	4.53				
	4.75	4.62	6.01	6.83	6.37	7.02				
	0.81	1.86	1.05	1.72	1.09	3.16				
	7.22	7.53	9.19	10.88	10.13	12.11				
	5.48	5.31	5.14	5.49	5.29	5.64				
结构相似度 SSIM	1.00	0.64	0.67	0.62	0. 59	0.92				
	1.00	0.86	0.54	0.44	0.49	0.61				
	1.00	0.48	0.56	0.49	0.49	0.61				
	1.00	0.79	0.53	0.44	0.48	0. 54				
	1.00	0.78	0.59	0. 52	0. 58	0.66				

表 2 不同去雾算法评价指标比较

Fab. 2 Comparison of evaluation indexes of different defogging algorithm

从表2可见,在白天图像中,原图的明亮度足够,此时再进行光照增强并不能增强除雾效果,甚至压缩明亮度会使图像的清晰度降低,夜晚图像经ALTM局部光照增强后,除结构相似度指标比原图差以外,其余指标均远远高于其他算法,因此把黑暗中的图像进行适当光照增强十分有必要。

由各评价指标对比可见,本研究的融合改进算 法为几种算法中最理想的。用亮暗通道结合算法 处理后的图像,其方差、对比度、平均梯度相对暗通 道先验算法更高,表明亮暗通道结合算法处理后的 图像细节丰富,颜色反差鲜明,视觉效果更好,比之 前的经典算法有所改善,但从结构相似度可以明显 看出图像色彩失真严重(且存在晕轮效应),因此说 明经过亮暗通道处理后的图像不能够在丰富图像 细节的同时保证色彩的真实。根据表 2 中数据可以 看出,对亮暗通道融合算法进行高斯滤波,不仅保 证了图像的对比度和亮度而且能使色彩的恢复更 加切合实际情况。

综上所述,无论白天还是夜晚,优化改进算法 从衡量指标上观察均优于原拍摄图片及其他算法, 这说明优化改进的融合算法在多种评价维度的效 果都是较理想的,最终能得到细节丰富、颜色鲜明、 亮度适中的森林图像。

4 结论

优化改进的融合算法针对森林环境的特点,首

先对采集图像亮度进行自适应调整后,结合先进的 亮暗通道融合算法得到较理想的全局大气光等参 数值,使图像处理效果较好;后续采用高斯曲率滤 波算法进行图像的平滑处理,使图像在去除晕轮效 应的同时还能保留完整的边缘信息。融合频域滤 波的物理模型去雾方法不仅从大气辐射的计算公 式中对参数值进行优化,而且解决了物理模型带来 的光晕效应问题,能得到细节丰富、视觉效果良好 的清晰完整的森林去雾图像。

【参考文献】

- [1] NARASIMHAN S G, NAYAR S K. Vision and the atmosphere
 [J]. International Journal of Computer Vision, 2002, 48(3): 233-254.
- [2] 孙丽萍, 卢俊彤, 张怡卓, 等. 森林雾天单幅图像复原的研究
 [J]. 计算机仿真, 2018, 35(4): 390-394.
 SUN L P, LU J T, ZHANG Y Z, et al. Research on restoring single foggy forest image [J]. Computer Simulation, 2018, 35(4): 390-394.
- [3] 崔尚勇.改进量子遗传算法的图像增强研究[J].自动化技术与应用,2020,39(7):96-100.
 CUISY. Image enhancement research based on improved quantum genetic algorithm[J]. Techniques of Automation and Applications, 2020, 39(7): 96-100.
- [4] 唐敏,刘英,费叶琦,等. 图像处理技术在现代林果采摘中的应用[J]. 林业机械与木工设备,2020,48(4):4-7.
 TANG M, LIU Y, FEI Y Q, et al. Application of image processing technology in modern forest fruit picking[J]. Forestry Machinery & Woodworking Equipment, 2020, 48(4): 4-7.
- [5] LIANG W, LONG J, LI K C, et al. A fast defogging image recognition algorithm based on bilateral hybrid filtering[J]. ACM Transactions on Multimedia Computing, Communications, and Applications, 2021, 17(2): 1-16.
- [6] ABRAHAMS A, ORAM C, LOZANO-GRACIA N. Deblurring DM-SP nighttime lights: a new method using Gaussian filters and frequencies of illumination [J]. Remote Sensing of Environment, 2018, 210: 242-258.
- [7] 郑鑫. 通过混浊大气介质的成像质量研究[D]. 合肥:中国科学技术大学,2019.
 ZHENG X. Study on imaging quality through turbid atmosphere
 [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2019.
- [8] LI C L, FAN T H, MA X, et al. An improved image defogging method based on dark channel prior [C]//2017 2nd International Conference on Image, Vision and Computing (ICIVC). June 2-4, 2017, Chengdu. IEEE, 2017: 414-417.
- [9] YAN Y Y, REN W Q, GUO Y F, et al. Image deblurring via extreme channels prior[C]//2017 IEEE Conference on Computer Vi-

sion and Pattern Recognition. July 21-26, 2017, Honolulu, HI, USA. IEEE, 2017: 6978-6986.

- [10] 李鹏飞,何小海,卿粼波,等. 暗通道融合亮通道优化的夜间图 像去雾算法[J]. 液晶与显示,2021,36(4):596-604.
 LI P F, HE X H, QING L B, et al. Nighttime dehazing algorithm of dark channel and bright channel fusion optimization [J]. Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays, 2021, 36(4): 596-604.
- [11] HE K M, SUN J, TANG X O. Single image haze removal using dark channel prior[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2011, 33(12): 2341-2353.
- [12] 蒯峰阳,张丹. 基于亮暗通道相结合的自适应图像去雾算法
 [J]. 计算技术与自动化,2021,40(2):118-124.
 KUAI F Y, ZHANG D. Adaptive single image haze removal using integrated dark and bright channel prior[J]. Computing Technology and Automation, 2021, 40(2): 118-124.
- [13] 赵伟,张南楠. 恶劣雾霾天气车牌图像增强算法仿真[J]. 计算机仿真,2019,36(3):207-211.
 ZHAO W, ZHANG N N. Simulation of license plate image enhancement algorithm in severe hazy weather[J]. Computer Simulation, 2019, 36(3): 207-211.
- [14] 庄秀玲,谭福奎,李震,等. 基于暗通道先验和优化自动色阶的 图像去雾算法[J]. 计算机应用与软件,2021,38(7):190-195.
 ZHUANG X L, TAN F K, LI Z, et al. Image defogging algorithm based on dark channel prior and optimized auto-color[J]. Computer Applications and Software, 2021, 38(7): 190-195.
- [15] AHN H, KEUM B, KIM D, et al. Adaptive local tone mapping based on retinex for high dynamic range images [C]//2013 IEEE International Conference on Consumer Electronics. January 11-14, 2013, Las Vegas, NV, USA. IEEE, 2013: 153-156.
- [16] LEE S H, SEO J K. Noise removal with Gauss curvature-driven diffusion[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2005, 14 (7): 904-909.
- [17] GONG Y H. Spectrally regularized surfaces [D]. Switzerland: ETH Zurich, 2015.
- [18] 林朝剑,张广群,杨洁,等.基于迁移学习的林业业务图像
 识别[J].南京林业大学学报(自然科学版),2020,44
 (4):215-221.

LIN C J, ZHANG G Q, YANG J, et al. Transfer learning based recognition for forestry business images [J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Science Edition), 2020, 44(4): 215-221.

- [19] 陈维桓. 微分几何初步[M]. 北京:北京大学出版社,1990.
 CHEN W H. Preliminary of differential geometry[M]. Bejing: Peking University Press,1990.
- [20] 杨珂珂,贾渊,沈川.结合曲率滤波的 HTM 算法去除遥感影像 云雾[J].中国图象图形学报,2020,25(4):791-800.
 YANG K K, JIA Y, SHEN C. Haze and cloud removal from remote sensing image using HTM algorithm based on curvature filtering[J].
 Journal of Image and Graphics, 2020, 25(4): 791-800.