

文章编号:1007-2780(2017)10-0835-11

基于正交偏振方向的多幅图像复原新方法

彭文竹^{1*}, 张 禹², 王 钦¹, 吴亚建¹

(1.集美大学 诚毅学院, 福建 厦门 361021;

2.福建江夏学院 电子信息科学学院, 福建 福州 350108)

摘要: 本文根据大气场景成像过程中的偏振效应原理, 建立偏振成像方程, 提出一种基于两幅偏振化方向互相垂直的图像复原新方法。该方法从多幅偏振图像复原原理出发, 结合大气散射物理模型推导出新的偏振图像复原方程; 采用双边滤波原理估算偏振图像大气耗散函数; 结合图像评价指标自适应调整大气耗散函数, 寻找最佳雾浓度分布; 选取合适参数调整方法解决含有大面积天空区域雾霾图像复原所产生的晕轮效应。对采用传感器和 KENKO CPL67MM 偏振滤镜所获取的偏振图像进行大量实验测试, 并和当前较具代表性的单幅图像复原方法进行比较分析。结果表明, 本文的多幅偏振图像复原方法取得了更好的图像复原效果。

关键词: 偏振光; 双边滤波; 大气耗散函数; 图像评价指标; 晕轮效应

中图分类号: TP391 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/YJYXS20173210.0835

New method of multiple image restoration based on orthogonal polarization direction

PENG Wen-zhu^{1*}, ZHANG Yu², WANG Qin¹, WU Ya-jian¹

(1.Chengyi University College, Jimei University, Xiamen Fujian 361021, China;

2. Electronic and Information Science College, Fujian Jiangxia University,
Fuzhou 350108, China)

Abstract: According to the principle of polarization effect in the process of atmospheric scene imaging, the polarization imaging equation is established, and a new image restoration method based on the two polarization directions is proposed. A new polarization image restoration equation is derived by combining the atmospheric scattering physical model based on the principle of multiple polarization image restoration. First, the method uses bilateral filtering to estimate the atmospheric veil by the polarization image, and adaptively adjust it according to the image evaluation index. Finally, we restore the original clear image of polarization image combining the image matching and fusion restoration equation and select the appropriate parameter adjustment method to solve the large sky area containing the halo effect caused by haze image restoration. The experimental results by the polarization images obtained

收稿日期: 2017-04-17; **修订日期:** 2017-06-09.

基金项目: 福建省自然科学基金项目资助(No.2017J01733); 福建省教育厅中青年教师教育科研科技类基金项目资助(No.JAT160693); 集美大学诚毅学院教育教学改革项目资助(No.C16067)

Supported by Natural Science Foundation of Fujian Province(No.2017J01733); Education and Teaching Reform Project of Chengyi College, Jimei University(No.C16067)

* 通信联系人, E-mail: 86800347@qq.com

by the sensor and the KENKO CPL67MM polarizing filter were compared with those of the representative single image restoration methods. The results show that the algorithm can effectively recover the fog image and automatically adjust the parameters because the restoration information is more abundant.

Key words: polarized light; bilateral filtering; atmospheric veil; image evaluation index; halo effect

1 引言

在雾天情况下,传感器所获取的图像由于空气中悬浮的大量雾霾、尘埃等微小粒子的散射作用而导致对比度降低、图像特征衰减严重,彩色图像还会有色调严重偏移的现象。极大限制和影响户外视觉系统效用的发挥,甚至无法正常工作。因此,复原雾天降质图像,提高其对比度和清晰度具有极其重要的意义。

早期对于雾霾图像的复原处理主要采用图像增强,该方法主要包含有直方图均衡化^[1]、同态滤波^[2]、小波变换^[3]、Retinex 算法^[4]以及局部对比度^[5]和局部方差增强^[6]等算法。这类算法不分析图像退化的原因,主要通过提高对比度来增强图像的细节信息,导致复原效果受到很大限制。近年来,雾霾图像复原的方法主要采用图像退化物理机制,在此基础上建立物理成像方程,并对方程进行反演计算,补偿退化过程造成的损失,进而得到清晰无雾图像而得到广泛应用。这类方法根据退化图像的先验知识来复原图像,恢复效果自然,图像信息损失较少。

基于物理模型的复原方法,因为其具有的内在优越性而成为当前的研究热点。在多幅图像的复原方法中,由于其参考信息较多的优势而得到了许多学者的青睐。Narasimhan 等人根据多个角度对提取场景深度信息的方法进行研究,提出通用的去雾模型,去雾效果大大提升,但是由于其需要获取同一场景不同季节图像,受到极大约束^[7]。Schechner 等人首先提出了在大气散射物理模型的基础上,利用偏振成像设备获取同一场景点不同偏振光条件下的多幅图像,然后对图像偏振度和其他参数的估算来还原雾天图像,取得较好复原效果,但是该方法需要通过人机交互方式来对偏振参数进行估计,使用效率较低^[8-9]。近年来,单幅图像的复原技术有了很大的发展。He 等人提出一种基于暗

通道的单幅图像复原方法,该方法通过统计发现暗原色的规律,根据该规律按雾气浓度局部修复图像各部分颜色,就能恢复出清晰的图像,但该方法对传播图进行优化需要建立大规模的稀疏线性方程,其空间和时间复杂度较高^[10]。针对 He 方法的不足,研究学者在此基础上提出了一些改进方法。例如,Tarel 等人提出一种采用中值滤波估算大气耗散函数的方法,达到快速去雾的目的,且复原效果较好^[11]。但是由于中值滤波器并非好的边缘保持滤波器,不恰当的参数设置容易引入光晕效应,且该方法参数较多不易调整,应用存在诸多不便。

本文在 Schechner 等人偏振图像去雾算法原理的基础上,提出一种利用多幅偏振图像去雾的新方法。该方法针对 Tarel 算法中存在的不足,结合偏振图像融合原理,提出一种新的解决方法以克服图像边缘和天空区域的晕轮效应,最后根据评价指标实时调整算法参数,自适应调节大气耗散函数从而达到最佳复原效果。并将实验结果和复原效果较好的单幅图像复原方法进行比较,采用主客观评价方式,说明本文所提出多幅图像改进复原方法的有效性。

2 Tarel 算法原理及存在的问题

2.1 算法原理

McCartney 在 1975 年提出著名的大气散射物理模型,根据其模型可以详细了解雾天图像退化的物理过程,观察者通过传感器观察到的景物成像机制简化为入射光的衰减模型和环境光模型的同时作用,通过以下的数学模型来进行描述^[12]:

$$I(x) = L(x)t(x) + A_{\infty}(1-t(x)), \quad (1)$$

其中, $I(x)$ 表示通过传感器获得的雾化图像; $L(x)$ 表示目标景物的原始清晰图像; A_{∞} 分别表示全局大气散射光,通常为常量数值; $t(x)$ 为介质传输率函数,目标景物信息的透射率系数,该值的

大小代表了光线穿透雾的能力大小。

Tarel 在暗通道的基础上提出了一种快速滤波大气耗散函数的方法^[11]。首先,根据大气耗散函数的物理特性可以知道,其值应具备如下两个条件:一是大气耗散函数绝对不可能是负数;二为该值小于雾霾原图像在各个像素点位置的最小值。然后,使用该约束条件估算大气散射光分布图,但是由于利用该浓度图进行图像复原,会导致图像亮度过暗,而且会有人为光晕痕迹,因此 Tarel 采用中值滤波方法进行优化,最终实现图像复原,且复原速度大大提升,复原效果显著,但是仍然存在有不少缺点。

2.2 算法存在的不足

通过 Tarel 方法对雾天偏振图像进行复原,发现存在以下 3 个问题:

(1)边缘保持性较差,例如树叶等边缘处易产生光晕效应。Tarel 算法利用中值滤波的方法对图像大气耗散函数进行估算,然而中值滤波并不能很好地保持边缘,其滤波参数的不恰当设置容易对雾天图像边缘部分产生光晕效应。图 1 为在适当选取滤波窗口情况下,采用该方法所得到的图像复原结果。从图中可看出,该算法虽然在图像复原效果上有较大改善,但是在复原结果图像中如树叶以及石头边缘等仍然存在光晕伪影现象。

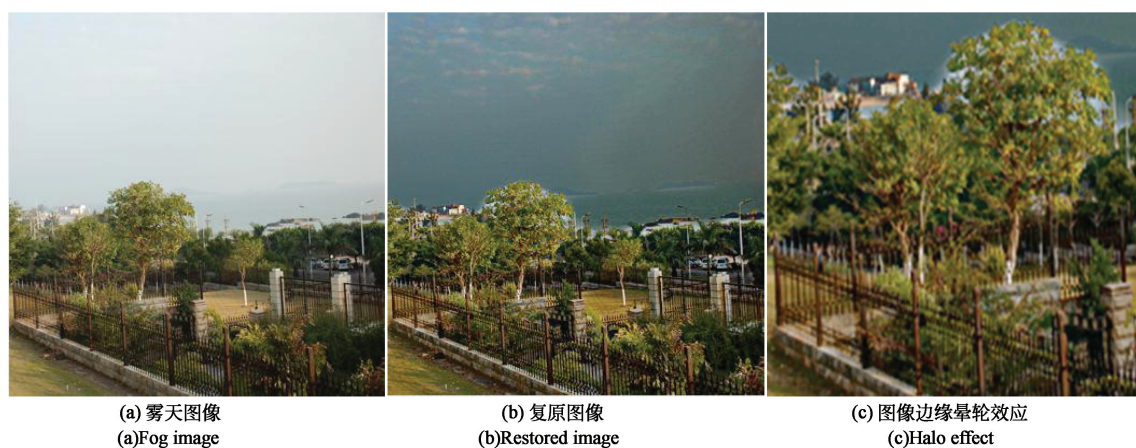


图 1 Tarel 方法复原结果及产生的晕轮效应

Fig.1 Tarel method results and halo effect

(2)对于存在有大面积天空的雾霾图像,该区域容易产生光晕伪影现象。这是因为所获取的大气耗散函数在天空区域不够平滑所导致的结果。

从图 2 复原结果可以看出,随着滤波窗口变小,图像如树叶、海边等边缘部分的光晕现象有一定改善,但是天空区域的光晕伪影现象却更为明显。



图 2 复原强度系数相同,滤波窗口不同时复原结果比较

Fig.2 Restored results by the same strength coefficient and the different filtering window

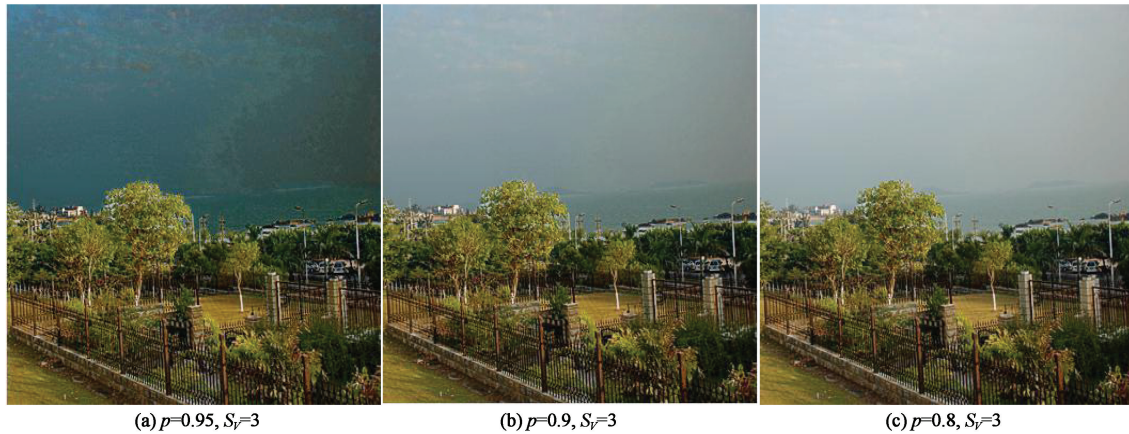


图 3 滤波窗口相同,复原强度系数不同时复原结果比较

Fig.3 Restored results by the same filtering window and the different strength coefficient

(3) 该算法所涉及参数较多,且参数不易调整。根据以上对算法原理的分析可知,Tarel 算法需要对中值滤波窗口大小和复原强度条件系数进行调整,适当人工选取调整之后,才能保证最终的复原图像质量。如图 2 为强度系数相同,滤波窗口不同条件下的复原结果,滤波窗口选取难度较大,在克服图像边缘复原效果抑制晕轮效应的同时,天空区域所产生的晕轮效应却更为明显;图 3 为滤波窗口相同时,雾霾控制强度系数不同的复原结果,当雾霾控制强度系数越大时,图像复原效果存在过于增强现象,而当参数过小时,复原结果在视觉效果上又没有明显改善,强度系数具体数值选取较难把握。

根据以上分析可知,Tarel 算法中的参数较多,不恰当的取值将对去雾结果产生较大影响,而合适的算法参数不易调整,需要通过人工不断尝试才可以得到,在实际应用中存在诸多不便,并且无法完全克服由于滤波器的原因而产生的晕轮效应。因此,本文根据 Tarel 方法中存在的不足进行算法改进,提出一种新的偏振图像复原新方法。

3 算法改进及在多幅偏振图像去雾中的应用

Schechner 等人根据大气散射理论和光的偏振特性原理,对偏振图像复原模型进行重新定义。传感器在采集图像时需要在传感器前加装一个偏振滤镜,然后通过旋转偏振滤镜调节偏振化方向,

得到偏振化方向互相垂直(分别为 0° 和 90°)的两幅图像 $I^{\parallel}$ 和 $I^{\perp}$ 。根据光矢量模型分析,成像系统的总光强计算如下所示,

$$I = I^{\parallel} + I^{\perp}. \quad (2)$$

结合式(1)图像退化过程的数学表达式,有:

$$I^{\parallel}(x) + I^{\perp}(x) = L(x)t(x) + A_{\infty}(1-t(x)), \quad (3)$$

对上式进行反演计算,可得无雾图像 $L(x)$ 的偏振复原表达式:

$$L(x) = \frac{I^{\parallel}(x) + I^{\perp}(x) - A_{\infty}[1-t(x)]}{t(x)}. \quad (4)$$

将大气散射表达式 $V(x) = A_{\infty}(1-t(x))$ 代入式(4),偏振雾天图像复原方程可转化为:

$$L(x) = \frac{I^{\parallel}(x) + I^{\perp}(x) - V(x)}{1 - \frac{V(x)}{A_{\infty}}}. \quad (5)$$

因此,根据式(5)若要对清晰图像 $L(x)$ 进行

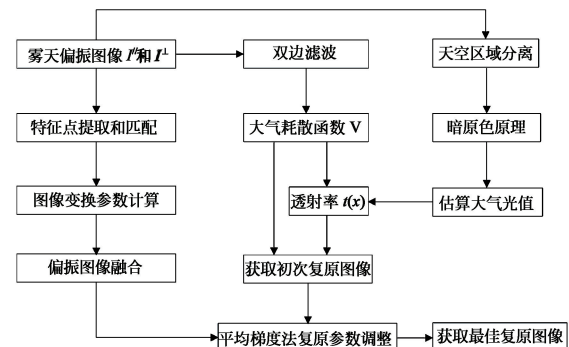


图 4 改进算法的偏振图像复原流程

Fig. 4 Polarization image restoration flow chart based on improved algorithm

复原,需要对总光强 $I = I^{\parallel} + I^{\perp}$ 、无穷远处大气光 A_{∞} 和大气耗散函数 $V(x)$ 三个未知参量进行估算,在得到初始大气耗散函数之后,采用合适的优化方法进行精细化操作,并在得到较好的复原结果的同时有效去除光晕效应。本文提出方法的具体流程如图 4 所示。

3.1 多幅偏振图像总光强估算

对偏振图像总光强的计算,本文采用图像融合处理方法,将其应用于偏振图像去雾领域。根据图像的偏振成像原理可知,在经过计算和融合处理之

后,能够增强图像清晰度,具体算法过程如下:

Step1. 分别提取偏振化方向互相垂直的两幅图像 $I^{\parallel}$ 、 $I^{\perp}$ 的特征点并匹配,构成初始特征点对集 $F \{(x_i, y_i) | i = 1, 2, 3, \dots, n\}$, $F' \{(x_j, y_j) | j = 1, 2, 3, \dots, n'\}$ 。式中: n 、 n' 分别为图像 $I^{\parallel}$ 和 $I^{\perp}$ 特征点个数。

Step2. 根据相关性原理^[13],对上述两幅偏振图像进行初始匹配。计算 F 、 F' 中每个特征点模板之间的互相关系数 NCC_{ij} ,

$$NCC_{ij} = \frac{\sum_{u=-1}^1 \sum_{v=-1}^1 [f(x_i + u, y_i + v) - \bar{f}(x_i, y_i)][f'(x'_j + u, y'_j + v) - \bar{f}'(x'_j, y'_j)]}{\left\{ \sum_{u=-1}^1 \sum_{v=-1}^1 [f(x_i + u, y_i + v) - \bar{f}(x_i, y_i)]^2 \sum_{u=-1}^1 \sum_{v=-1}^1 [f'(x'_j + u, y'_j + v) - \bar{f}'(x'_j, y'_j)]^2 \right\}^{1/2}}, \quad (6)$$

式中: f 、 f' 表示 F 和 F' 集合中各个特征点的灰度, $\bar{f}$ 和 $\bar{f}'$ 为模板中所有像素灰度的平均值。其中 $-1 \leq NCC_{ij} \leq 1$, 依据 $NCC_i = \max_{j=1,2,\dots,n'} (NCC_{ij})$ 获取 F 和 F' 中初始匹配的特征点对集。

Step3. 根据仿射变换原理列出偏振图像变换参数的表达式,式中 m_1 、 m_2 、 m_3 、 m_4 、 m_5 和 m_6 为变换模型参数, (x, y) 和 (x', y') 分别表示原图像和经过图像变换后新图像中的坐标点。

$$\begin{cases} x = m_1 x' + m_2 y' + m_3 \\ y = m_4 x' + m_5 y' + m_6 \end{cases} \quad (7)$$

依据图像变换的 6 个未知参量,从特征点对集 M 中任选 3 个初始匹配特征点对 (C_m^3), 组成 6 个方程,根据图像参数变换表达式(7)计算其中一组参数 $P_i (m_1, m_2, m_3, m_4, m_5, m_6)$ ($1 \leq i \leq C_m^3$)。

Step4. 选择初始匹配集合中的特征点对,如 $[(x, y), (x', y')]$, 计算 (x', y') 在参数 P_i 下对应的点坐标 (x'', y'') 及 (x'', y'') 与 (x, y) 的归一化相关系数 NCC 。若满足 $NCC > T$ (T 为设定的阈值), 则 $[(x, y), (x', y')]$ 符合参数 P_i 。继续查找直到所有特征点对都满足参数 P_i 。计算符合特征点对数量 sum_i 。

Step5. 重复查找所有初始匹配特征点对, 依据 $sum = \max(sum_i) (0 \leq i \leq C_m^3)$ 找出其最大值

所对应的 P_i 即为最后确定参数,配准参数计算结束后,即可实现图像融合。

3.2 大气光估算

无穷远处大气光 A_{∞} 。估算对图像的复原很重要,其数值通常取图像的某个像素点值,研究学者通常取图像最大强度值,但是该方法易受到图像中白色景物的影响而导致估算失败。本文致力于在复原近景的同时,能更好去除偏振图像远方雾霾,因此从无穷远处天空区域部分取值,且通过对天空部分亮度的平均值来进行估算,更能接近全局大气光的定义。

本文根据雾霾偏振图像天空部分的深度基本一致且图像的灰度值近似正态分布,因此采用最佳正态分布搜索算法分离图像天空区域。利用暗原色先验规律,取天空区域的暗通道中亮度值大小为前 0.1% 的像素,确定这些像素在输入图像中的位置,取天空部分这些位置所对应的原有雾图像区域中的亮度均值即偏振图像的大气光数值 A_{∞} 。正态分布搜索算法分离图像天空区域后,采用式(8)对大气光进行估算, n 表示天空区域像素点个数。

$$A_{\infty} = \frac{\sum A_i}{n} \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (8)$$

3.3 偏振图像复原算法改进及自适应调节方法

中值滤波在一定条件下能够解决线性滤波器产生的图像细节模糊问题,能够保护边缘信息,对

滤出脉冲干扰及图像扫描噪声非常有效,但却不是很好的边缘保持滤波器。双边滤波是一种同时考虑空域信息和灰度相似性且结合图像的空间邻近度与像素值相似度的折中处理方法,其双重滤波作用中最大的优点是可以很好地保持边缘,因此本文采用边缘保持性更好的双边滤波方式对大气耗散函数进行优化计算,以克服图像边缘所产生的 Halo 效应。

双边滤波器包含了两个高斯基滤波函数,因此在对区域内相邻各像素数值进行处理时,需要考虑到各像素数值的邻近几何关系和各像素数值亮度上的相似性,然后根据对二者的非线性组合,获得自适应滤波平滑后的图像^[14]。双边滤波器输出像素数值取决于其邻域值的加权组合,

$$g(i, j) = \frac{\sum_{k, l} f(k, l) \omega(i, j, k, l)}{\sum_{k, l} \omega(i, j, k, l)}. \quad (9)$$

定义域核 $d(i, j, k, l)$ 和值域核 $r(i, j, k, l)$ 的乘积决定了系数 $\omega(i, j, k, l)$ 的取值,

$$d(i, j, k, l) = \exp\left(-\frac{(i-k)^2 + (j-l)^2}{2\sigma_d^2}\right), \quad (10)$$

$$r(i, j, k, l) = \exp\left(-\frac{\|f(i, j) - f(k, l)\|^2}{2\sigma_r^2}\right), \quad (11)$$

$$\omega(i, j, k, l) = \exp\left(-\frac{(i-j)^2 + (j-l)^2}{2\sigma_d^2} - \frac{\|f(i, j) - f(k, l)\|^2}{2\sigma_r^2}\right). \quad (12)$$

高斯滤波之所以会导致结果丢失边缘的信息是因为只考虑像素间的空间位置上的关系,而双边滤波在其基础上加入另一权重部分来解决这一问题,因此可以抑制由于景物深度变化而在边缘处引起的晕轮效应。

根据上文分析大气耗散函数表达式和偏振图像复原方程,可列出本文最终偏振图像复原表达式,

$$L(x) = \frac{I^{//}(x) + I^{\perp}(x) - kV(x)}{\max(t(x), t_0)}. \quad (13)$$

参数 k 用于控制雾霾去除程度,调整复原图像所保留的雾气量以获取最佳大气耗散函数;引入参数 t_0 的最主要作用在于改善大面积天空区域中出现的光晕伪影现象,并调整图像最远端的雾气,同时增加复原图像的曝光度,以防止复原图像过于暗淡。原算法中,对于雾霾控制参数和滤波窗口只取单一数值,实验表明,该取值方式仅只能作为初始参考数值,对于纷繁复杂的实际场景情况,无法适用。因此本文根据偏振图像的特点,采用平均梯度法实时调整参数数值,得到最佳大气耗散函数和透射率函数,从而获取最佳复原结果。

平均梯度表示图像微小细节反差变化的速率,能够客观评价图像的相对清晰程度。其变化率的大小表示图像的相对清晰程度,平均梯度的数值和图像的层次多少成正比,数值越大,图像就更为清晰,其定义如下所示^[15]。

$$AG = \frac{1}{(M-1)(N-1)} \times \sum_{i=1}^{M-1} \sum_{j=1}^{N-1} \sqrt{\frac{(F(i, j) - F(i+1, j))^2 + (F(i, j) - F(i, j+1))^2}{2}}, \quad (14)$$

式中: M, N 表示图像的行列数, $F(i, j)$ 表示图像像素位置 (i, j) 对应的灰度值。本文在求取偏振图像大气耗散函数和无穷远处大气光估算之后,对参数 k 设定初始数值, t_0 按照本文所研究偏振图像特点取值为 0.34 可有效解决天空区域的 Halo 效应,从而根据复原方程式(13)得到初次去雾图像,然后根据复原图像平均梯度调整参数数值,以获得最佳大气耗散函数和透射率函数,并得到最终复原结果。

综上所述,利用偏振图像大气耗散函数改进算法及参数自适应调整算法复原图像步骤如下:

Step1. 对原始偏振图像 I 的每个通道进行归一化操作,将像素数值归一化到 0~1 之间,再对图像的 3 个彩色通道进行最小化操作,取最小值作为粗糙大气耗散函数估计值,用 $M(x, y)$ 表示, $M(x, y) = \min_{c \in \{r, g, b\}} (I^c(x, y))$ 。

Step2. 通过双边滤波方法对粗糙大气耗散函数进行平滑优化,保持景物边缘细节信息,并根据上文分析的约束条件计算精细大气耗散函数 $V(x, y)$,

$V(x, y) = \max(\min(B(x, y), W(x, y)), 0)$, 式中: $B(x, y) = Av(x, y) - b_{\text{filter}}(|W - Av|(x,$

$y)), Av(x, y) = b_{\text{filter}}(W(x, y))$ 。

为了控制最终视觉效果复原程度,不至于过度复原或复原程度不够,而引入控制系数,因此在复原方程中的精细大气耗散函数前增加调整系数 k 。

Step3.按照上述所求无穷远处大气光 A_∞ ,根据大气耗散函数和透射率之间的关系 $V(x) = A_\infty(1 - t(x))$,得到优化后透射率 $t(x) = 1 - \frac{V(x)}{A_\infty}$ 。

Step4.引入天空区域控制参数 t_0 ,根据偏振图像特点设定其值为固定值 0.34,主要目的在于去除天空区域晕轮效应。

Step5.根据偏振图像复原方程 $L(x) = \frac{I^{\prime\prime}(x) + I^\perp(x) - kV(x)}{\max(t(x), t_0)}$,设定初始值 $k=1$ 为完全复原参数及控制系数减少步长值 T_1 ,偏振化方向互相垂直的两幅图像 $I^{\prime\prime}$ 和 $I^\perp$,以及所求参数 $V(x)$ 、 $t(x)$ 求得最初偏振去雾图像 $L_1(x)$,并求初始复原图像评价梯度值 AG_1 。

Step6.根据步长值 T_1 ,对参数 k 进行调整,并计算调整后复原偏振图像 $L_2(x)$,及其平均梯度值 AG_2 。计算两次平均梯度之差是否超出所设定合适阈值 T_2 ,即 $|AG_2 - AG_1| \geq T_2$,若大于阈值,则此时的 $kV(x)$ 即为最佳大气耗散函数,所对应复原图像为最佳图像;若两者之差低于所设定阈值,则取 $AG_1 = AG_2$ 。

Step7.再次重复步骤 5 调整参数数值,求得新的复原图像及 AG_2 。再按照步骤 6 所给条件进行比较,如此反复,直到符合要求则参数调整结束,此时所复原的结果即为最终复原图像。

通过以上算法步骤,根据本文提出的两点抑制晕轮效应的改进方法:引入的参数 t_0 ,使得含有大面积天空区域偏振图像的大气耗散函数对应的天空部分更加平滑;双边滤波算法获得的大气耗散函数及透射率图,在景深突变地方的边缘向景深较小的区域缩进表现得更加突出,有效抑制光晕部分。图 5 为复原过程参数估算及有效抑制



图 5 改进算法最佳大气耗散函数结果及克服 Halo 效应结果示意图

Fig.5 Results of the best atmospheric veil and overcoming the halo effect based on improved algorithm

光晕效应的结果示意图,所得到的大气耗散函数和透射率函数边缘及天空区域更为精细平滑,在保证复原效果的同时,有效抑制了图像边缘和天空区域的晕轮效应。

4 实验结果及分析

为了验证本文所提出的改进方法在多幅偏振图像复原算法中可以达到良好的去雾效果,并可

以有效抑制光晕效应,以及通过自适应调节参数获取最佳大气耗散函数方法的有效性,将实验结果和 He 方法^[10]及 Tarel 方法^[11]进行比较。实验时所有偏振图像 $I^{\parallel}$ 、 $I^{\perp}$ 素材均为雾霾天气环境时,采用将 KENKO CPL67MM 偏振滤镜加装在 Nikon D80 单反相机前所获取,实验环境为 Intel(R) Core(TM) i5-3470 CPU @3.20 GHz 3.19 GHz,内存为 4 GB 的 PC 电脑,使用 MATLAB R2007b 仿真平台,实验结果如图 6 所示。



图 6 图像复原结果比较(说明: $I^{\perp}$ 篇幅限制未列出)

Fig.6 Comparison of different image restoration results (Notes: $I^{\perp}$ image is not listed because of space limited)

4.1 实验结果主观评价分析

图 6 共列出 3 组偏振图像复原结果,并将本文方法复原结果和 He 方法、Tarel 方法结果进行主客观评价比较分析,以说明本文所采用的偏振图像复原方法可以有效去除图像雾霾,能够克服光晕效应,图像对比度得到较大提高,复原效果更优于其他两种方法。

将本文方法实验结果与 He 方法结果相比较可知,本文提出的偏振图像方法复原效果在细节边缘方面和 He 方法相近,但是对于去除偏振图像远方山脉雾霾以及天空区域自然度方面,本文方法在两幅偏振图像信息较为丰富的前提下效果更佳,且对于算法复杂度来说,本文方法不需要构建拉普拉斯矩阵,而直接采用双边滤波方式,优化速度较快。

本文结果和 Tarel 方法相比较,有如下特点:从复原效果来看,本文方法在两幅图像配准融合的基础上,经过对大气耗散函数进行滤波优化,且经过平均梯度方法自适应调整大气耗散函数,近景的景物以及远方天空、山脉等细节均可看出,复原效果更好;从算法改进方面来看,本文改进偏振复原方法在树叶、海边石头以及远方天空区域方面完全没有了光晕伪影现象,且不需要进行参数调整,可以实现完全自动去雾过程,实用性得到极大提高。

4.2 实验结果客观评价分析

本文偏振图像复原方法是在图像配准融合基

础上,对参数进行估算调整,以达到图像去雾的目的,根据图像融合及参考图像去雾评价指标特点,采用图像信息熵^[16]和基于人眼视觉系统的结构相似性^[17-18](Structural similarity index, SSIM)评价方法对以上实验结果进行客观分析。信息熵是图像蕴含信息丰富程度的衡量指标,表示的是像素邻域内灰度分布的综合特征和图像像素位置的灰度信息,其数值越大,表示图像蕴含信息越多,具体计算公式如式(15)。

$$H = - \sum_{i=0}^{255} P_i \log P_i, \quad (15)$$

式中:对数取底数 2, P_i 表示灰度值 i 在该图像中出现的频率大小。

SSIM 是表示将一副图像分成由亮度、结构和对比度 3 个部分构成,然后比较后进行加权乘积所得到,其计算数值可作为图像复原质量好坏的评价指标,计算方法如下,

$$\text{SSIM} = \frac{(2\mu_I\mu_J + C_1)(2\sigma_{IJ} + C_2)}{(\mu_I^2 + \mu_J^2 + C_1)(\sigma_I^2 + \sigma_J^2 + C_2)}, \quad (16)$$

其中: I 为参考图像, J 表示待评价图像, μ_I 、 μ_J 、 σ_I 和 σ_J 两幅图像所对应的均值与方差大小; C_1 和 C_2 为常数值; σ_{IJ} 表示图像 I 和 J 之间的协方差, SSIM 值的大小代表了结构相似性的高低。

表 1 和表 2 分别给出了以上 3 组实验结果在 SSIM 和信息熵两种评价指标中的具体数值大小。从信息熵所计算的表格数据中可以看出, He 方法、Tarel 方法和本文方法,都在一定程度上对偏振雾天图像的清晰度和对比度均有一定的改善,

表 1 SSIM 评价指标对比

Tab.1 Comparison of SSIM evaluation index

实验结果	He 方法 ^[10]	Tarel 方法 ^[11]	本文方法
复原结果 1	0.819 000	0.797 134	0.945 589
复原结果 2	0.836 237	0.766 076	0.899 573
复原结果 3	0.849 435	0.819 002	0.948 856

表 2 信息熵评价指标对比

Tab.2 Comparison of information entropy evaluation index

实验结果	原始图像 $I_{//}$	原始图像 $I_{\perp}$	He 方法 ^[10]	Tarel 方法 ^[11]	本文方法
复原结果 1	13.529 19	13.920 00	14.365 53	14.219 91	15.239 51
复原结果 2	13.680 69	13.252 89	14.183 21	14.163 47	15.105 13
复原结果 3	13.047 35	13.009 35	13.958 25	13.500 51	14.543 33

但是 Tarel 方法的信息熵总体相对较低,说明其对于偏振图像处理区域较为不自然,效果不是太理想。本文方法的复原图像由于输入图像本身有两幅偏振图像,其结果蕴含信息的丰富程度相比其他两种方法均有较大提高。从 SSIM 结构相似度表格数据中可以看出,本文方法相比 He 方法和 Tarel 方法的数值更高,表明其具有较好的相似结构相似性,符合以上主观评价的结果。

5 结 论

本文通过分析 Tarel 所提出的图像去雾算法原理,致力于解决该方法所产生的光晕伪影现象以及参数较多且不易调整的缺点。根据对该原理的分析及偏振图像的特点提出一种新的图像复原新方法。算法具体实现过程为:首先,在偏振光图像

去雾原理的基础上,将双边滤波方法代替原有的滤波方式以解决雾天图像边缘处所产生的光晕现象;然后,适当引入透射率调整参数以减少天空区域晕轮效应;最后通过图像评价指标平均梯度定量评价复原结果图像,并对其结果进行阈值判断以调整大气耗散函数,并使大气耗散函数达到最佳,获取最佳去雾结果。实验证明,本文所提出的偏振图像复原方法能够取得更好的清晰化图像的效果。

虽然本文方法在一定程度上达到了较好的复原效果,但是由于雾天环境较为复杂,本文方法也有其应用局限性。本文方法适用于去除含有大面积天空的图像及其远方雾霾,且在调整大气耗散函数时所使用的评价指标进行实时调整对于描述图像信息具有一定的局限性,后面将寻求更为合适的综合评价指标对大气耗散函数进行调整,以达到更好的图像复原效果。

参 考 文 献:

- [1] 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].中国图像图形学报,2004,9(1):124-128.
ZHU P, ZHU H, QIAN X M, et al. An image clearness method for fog [J]. *Journal of Image and Graphics*, 2004, 9(1): 124-128. (in Chinese)
- [2] SEOW M J, ASARI V K. Ratio rule and homomorphic filter for enhancement of digital colour image [J]. *Neuro-computing*, 2006, 69(7/9): 954-958.
- [3] RUSSO F. An image enhancement technique combining sharpening and noise reduction [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2002, 51(4): 824-828.
- [4] 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.
RUI Y B, LI P, SUN J T. Method of removing fog effect from images [J]. *Computer Applications*, 2006, 26(1): 154-156. (in Chinese)
- [5] 刘祖军,刘纯亮,梁志虎,等.基于动态直方图均匀化的对比度增强方法[J].光学技术,2005,31(3):376-379.
LIU Z J, LIU C L, LIANG Z H, et al. Contrast enhancement method based on dynamic histogram equalization [J]. *Optical Technique*, 2005, 31(3): 376-379. (in Chinese)
- [6] 詹翔,周焰.一种基于局部方差的雾天图像增强方法[J].计算机应用,2007,27(2):510-512.
ZHAN X, ZHOU Y. Algorithm based on local variance to enhance contrast of fog-degraded image [J]. *Computer Applications*, 2007, 27(2): 510-512. (in Chinese)
- [7] 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.
- [8] SCHECHNER Y Y, NARASIMHAN S G, NAYAR S K. Instant dehazing of images using polarization [C]//*Proceedings of the 2001 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. Kauai, HI, USA: IEEE, 2001, 1: I-325-I-332.
- [9] SCHECHNER Y Y, NARASIMHAN S G, NAYAR S K. Polarization-based vision through haze [J]. *Applied Optics*, 2003, 42(3): 511-525.
- [10] HE K M, SUN J, TANG X O. Single image haze removal using dark channel prior [C]//*Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. Miami: IEEE, 2009: 1956-1963.
- [11] TAREL J P, HAUTIERE N. Fast visibility restoration from a single color or gray level image [C]//*Proceedings*

- of 2009 IEEE 12th International Conference on Computer Vision, Kyoto, Japan; IEEE, 2009; 2201-2208.
- [12] MCCARTNEY E J. *Optics of the Atmosphere: Scattering by Molecules and Particles* [M]. New York: John Wiley and Sons, 1976; 23-32.
- [13] 张晓玲,许炎,王晓忠,等.基于薄雾偏振特性的图像融合方法[J].厦门大学学报:自然科学版,2011,50(3): 520-524.
- ZHANG X L, XU Y, WANG X Z, *et al.* Research on image fusion based on polarization of Haze [J]. *Journal of Xiamen University (Natural Science)*, 2011, 50(3): 520-524. (in Chinese)
- [14] TOMASI C, MANDUCHI R. Bilateral filtering for gray and color images [C]//*Proceedings of the IEEE 6th International Conference on Computer Vision*. Bombay: IEEE, 1998; 839-846.
- [15] 邓莉.针对明亮区域的自适应全局暗原色先验去雾[J].光学精密工程,2016,24(4):892-901.
- DENG L. Adaptive image dehazing for bright areas based on global dark channel prior [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, 24(4): 892-901. (in Chinese)
- [16] 王宇庆,王索建.红外与可见光融合图像的质量评价[J].中国光学,2014,7(3):396-401.
- WANG Y Q, WANG S J. Quality assessment method of IR and visible fusion image [J]. *Chinese Optics*, 2014, 7(3): 396-401. (in Chinese)
- [17] 李大鹏,禹晶,肖创柏.图像去雾的无参考客观质量评测方法[J].中国图像图形学报,2011,16(9):1753-1757.
- LI D P, YU J, XIAO C B. No-reference quality assessment method for defogged images [J]. *Journal of Image and Graphics*, 2011, 16(9): 1753-1757. (in Chinese)
- [18] 王宇庆,刘维亚,王勇.一种基于局部方差和结构相似度的图像质量评价方法[J].光电子·激光,2008,19(11): 1546-1553.
- WANG Y Q, LIU W Y, WANG Y. Image quality assessment based on local variance and structure similarity [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2008, 19(11): 1546-1553. (in Chinese)

作者简介:彭文竹(1982—),男,福建泉州人,实验师,硕士,主要从事电子信息类专业实验教学及图像处理研究。E-mail:86800347@qq.com