

基于偏振特性的雾霾降质图像融合复原方法

彭文竹¹, 王 钦¹, 吴亚建¹, 张 禹²

(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] 在大气散射理论模型的基础上, 分析了利用图像的偏振信息复原雾天图像的方法。根据图像偏振信息的复原算法原理, 研究了偏振特性的图像配准融合方法, 并在此基础上采用搜索最佳正态分布算法及自适应二维维纳滤波方法对模型参数的大气光和环境光深度图进行估算, 从而根据偏振图像复原方程达到复原清晰景物图像的目的。在 MATLAB 仿真平台进行图像复原测试, 并进行主客观评价分析, 结果表明该方法可以取得较好的图像复原效果。

[关键词] 偏振光; 图像融合; 正态分布; 深度图; 维纳滤波

[中图分类号] TP 391

Image Fusion Restoration Algorithm Based on Polarization Characteristics of Haze

PENG Wenzhu¹, WANG Qin¹, WU Yajian¹, ZHANG Yu²

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

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

Abstract: This paper analyzes the fog and haze days degraded image restoration method by polarization properties of light based on atmospheric scattering model. The principle of image registration and fusion is considered in depth, and a different image fusion method based on the polarization characteristics of fog is proposed according to the principle of polarization image fusion. To achieve a clear image from the fog degraded image, the parameters of atmospheric light and ambient light's depth map are estimated by using the optimal normal distribution algorithm and adaptive wiener filtering. The results show that, the proposed method in this paper can bring about better image restoration effect through the MATLAB simulation platform and analyze the experiments by subjective and objective evaluation.

Keywords: polarized light; image fusion; normal distribution; depth map; wiener filtering

0 引言

雾霾天气时, 由于大气散射的影响使户外自然场景图像出现对比度降低的现象, 无法满足大多视觉系统准确提取图像特征的要求, 造成这些应用系统无法正常工作。因此, 研究改善图像质量技术对增加这些视觉应用系统的可靠性具有现实意义。

雾天图像去雾算法一般有图像增强和图像恢复两种方法^[1-2]。由于图像增强方法不考虑图像质量

[收稿日期] 2016-10-13

[修回日期] 2017-04-01

[基金项目] 福建省自然科学基金项目(2017J01733); 福建省教育厅中青年教师教育科研科技类基金项目(JAT160693)

[作者简介] 彭文竹(1982—), 男, 实验师, 硕士, 从事图像处理方向研究。

下降的原因,因而,可能会造成图像突出部分信息的损失。图像恢复方法是基于大气散射物理模型原理的,该方法从图像物理成因的角度建立雾天成像模型,达到图像复原的目的,去雾效果较为理想,针对性也较强。

近年来,基于物理模型的图像复原方法中较具代表性的就是 He 等人^[3]提出的一种基于暗通道规律的单幅图像复原方法,该方法通过统计发现暗通道的规律,根据该规律按雾气浓度局部修复图像各部分颜色,就能恢复清晰图像,但该方法需对传播图进行优化,需要建立大规模的稀疏线性方程,使空间和时间复杂度较高。为了解决此优化方法的不足,实现雾霾图像快速复原,He 等人^[4]又提出了使用导向滤波(guided filter)的方法来代替原有软抠图方法优化传播图,但是使用导向滤波的方法需要利用雾天图像作为导向图,会导致传播图景深相同处的细节信息过于丰富,平滑度不够。虽然 He 等人所提出的方法^[3-4]取得了很好的图像复原效果,但是仍然存在不足,且所用信息来源为单幅图像,信息量较少。

光波是一种电磁波,其传播速度与电矢量和磁矢量垂直,是一种横波,具有偏振性^[5]。偏振现象自从被人们发现之后,便得到了广泛应用。Schechner 等人^[6-7]在大气物理散射模型的基础上,利用光的偏振特性,结合偏振信息获取同一场景条件下的不同特殊角度的两幅图像,估算图像偏振度,从而复原雾天降质图像。本文拟在文献[7]的基础上建立偏振图像去雾方程,根据图像融合技术,研究偏振图像配准融合方法,结合边缘检测原理提出偏振图像最佳正态分布搜索算法并根据自适应滤波方法估算大气光及两幅偏振图像的环境光深度图等所需参数,最终实现图像去雾。

1 偏振图像去雾原理

根据 Mie 散射理论对景物成像机制的描述,对传感器的成像模型简化为入射光的衰减和环境光成像两个模型^[8],如图 1 所示。

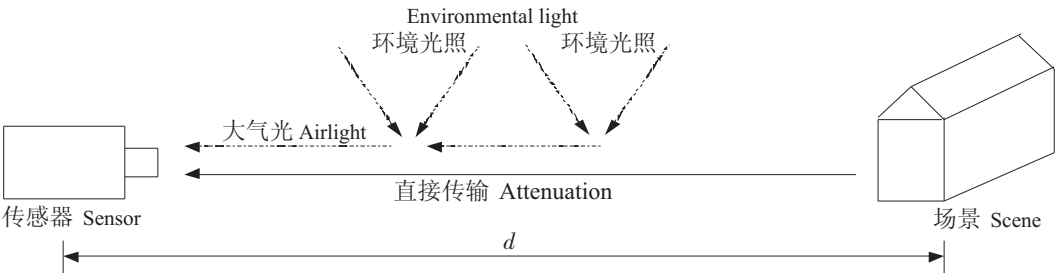


图 1 景物成像模型
Fig.1 Scene imaging model

从图 1 可以看出:由于大气粒子的散射作用,入射光衰减机制描述了景物光传播到接收装置中,有部分光通量被微粒吸收和反射的衰减过程,用 E_{dt} 表示;环境光成像模型是由大气微粒在传播过程中对四周环境的入射光产生的反射作用而形成的,用 E_a 表示。因此,在以上两个模型的共同作用下,传感器所接收到的光线总强度 E_{total} 为^[9-10]:

$$\begin{aligned} E_{total}(d, \lambda) &= E_{dt}(d, \lambda) + E_a(d, \lambda), \\ E_{dt}(d, \lambda) &= (E_{\infty}(\lambda) r(\lambda) e^{-\beta(\lambda)d}) / d^2, \\ E_a(d, \lambda) &= E_{\infty}(\lambda) (1 - e^{-\beta(\lambda)d}), \end{aligned}$$

其中, d 为景物点到观察者的距离; λ 为光的波长; $\beta(\lambda)$ 为全散射系数,表示单位体积的散射气体在各个方向上对入射光线的散射能力,该值越大即所产生的散射越厉害; E_{∞} 为天空照度, $r(\lambda)$ 为标准的辐射照度。

根据 Rayleigh 散射定理,大气散射能力与可见光的波长有关,因此,全散射系数 β 和波长 λ 之间

的关系为: $\beta(\lambda) \propto \lambda^{-\gamma}$ 。在雾天情况下, 由于大气微粒的尺寸 ($1 \sim 10 \mu\text{m}$) 相对波长来说比较大, 此时 $\gamma \approx 0$, 任何波长的光都以同样的比例反射, 这是雾天图像看起来灰蒙蒙的原因, 此时散射系数基本不受波长的影响。

从图像成像方程可知, 有雾图像的恢复受限于约束方程中的多个未知参量, 因此, 采用不同角度下相同场景的多幅图像可以提供更多的信息, 为图像复原提供更多条件。在大气散射物理模型的基础上, 得到传感器使用偏振滤镜成像的雾天图像方程为:

$$I(x) = D + A = L(x)e^{-\beta d(x)} + A_{\infty}(1 - e^{-\beta d(x)}), \quad (1)$$

其中, $I(x)$ 、 D 和 A 分别表示观察者接收到的光线总强度、景物光及散射光; x 表示二维空间位置; A_{∞} 为无穷远处的大气光; $L(x)$ 为原始清晰图像; d 为场景点与传感器的距离。介质传播系数 $t(x) = e^{-\beta d(x)}$, 代表光线穿透雾霾能力的大小。

本研究获取了相同场景不同偏振角度的两幅图像 I'' 与 I^{\perp} , 分别为偏振滤镜状结构和振动方向平行与垂直的图像:

$$I'' = D/2 + A'', \quad (2)$$

$$I^{\perp} = D/2 + A^{\perp}, \quad (3)$$

其中 $A'' = A(1-p)/2$, $A^{\perp} = A(1+p)/2$, p 为大气光的偏振度。因此, 通过式 (2) 和式 (3), 可得总光强为:

$$I^{\text{total}} = D + A = I'' + I^{\perp}。$$

由此, 得到偏振图像去雾方程:

$$L(x) = (I'' + I^{\perp} - A)/(1 - A/A_{\infty})。 \quad (4)$$

综上所述可知, 经偏振滤镜获取的两幅图像 I'' 和 I^{\perp} , 经过图像融合之后进行总光强的计算, 再对环境光参数 A 和无穷远处大气光 A_{∞} 进行估算, 则可以复原清晰无雾图像。

2 偏振图像融合及其参数估算方法

由于待融合偏振图像之间的空间差异对图像融合效果有着很大的影响, 所以对源图像进行融合前, 需要对待融合图像进行配准。本文图像配准的任务是对来自同一场景的两幅图像匹配其中对应于相同物理位置的像素点。两幅待配准图像是在同一时间采用相同视点位置和传感器, 通过旋转偏振滤镜改变偏振化方向而得到的, 融合的效果受限于图像配准精度。

2.1 偏振图像配准融合原理

根据所需的匹配任务以及参与匹配图像的数据特性, 确定所使用的特征匹配算法。由于 Harris 算子具有抗干扰能力强、精度高等优点, 并且可以凭借匹配结果定量改变所提取的特征点数量, 适合偏振图像的特征提取要求, 因此本文采用 Harris 算法进行特征点提取。

设两幅偏振图像为 I_1 和 I_2 , 对 I_1 、 I_2 提取特征点, 形成原始特征点集合 $P\{(x_i, y_i) | i = 1, 2, 3, \dots, n\}$, $P'\{(x'_j, y'_j) | j = 1, 2, 3, \dots, n'\}$, 其中: n 表示图像 I_1 特征点的个数; n' 表示图像 I_2 特征点的个数, Harris 特征点响应函数采用 Nobel^[11-12] 提出的计算公式:

$$\text{CRF} = \text{Det}(M)/\text{trace}(M) = (I_x^2 I_y^2 - (I_x I_y)^2)/(I_x^2 + I_y^2)。 \quad (5)$$

本文使用互相关原理进行特征点匹配, 此方法不直接采用特征点邻域的灰度值匹配原则, 而采用特征点邻域像素灰度值的互相关系数作为匹配原则。首先在待配准图像中的相应位置范围内搜索与参考图像的特征点 A 相应的特征点 B_i , 然后通过计算 A 与 B_i 特征点相关窗之间的互相关系数, 对互相关系数大于设定阈值的点 B_i 确定为 A 的匹配点。即, 对特征点集合 P 、 P' 中每一特征点确定一个以其为中心的模板 $W = (2N+1) \times (2N+1)$, 然后比较 P 中所选的特征点模板与 P' 中每个特征点的模板, 计算两个模板的互相关系数 $K_{\text{CC}} = \sum_{x,y \in W} [I_1(x,y)I_2(x,y)] / (\sqrt{\sum_{x,y \in W} I_1^2(x,y)} \sqrt{\sum_{x,y \in W} I_2^2(x,y)})$, 其

中, W 表示相关窗, 本文取 $W = 3$, I_1 和 I_2 分别表示两幅图像特征点相关联窗口内像素的灰度值。特征点匹配时, 选取互相关系数中值最大所对应的特征点作为该参考点的匹配点。最后对互相关系数进行归一化处理^[13], 其中 \bar{I}_1 和 \bar{I}_2 分别为对应图像特征点相关窗口像素灰度的平均值, 归一化后的互相关系数 K_{NCC} 的计算公式为:

$$K_{\text{NCC}} = \frac{\sum_{x,y \in W} [I_1(x,y) - \bar{I}_1][I_2(x,y) - \bar{I}_2] / \left\{ \sqrt{\sum_{x,y \in W} [I_1(x,y) - \bar{I}_1]^2} \sqrt{\sum_{x,y \in W} [I_2(x,y) - \bar{I}_2]^2} \right\}}{\frac{\sum_{u=-1}^1 \sum_{v=-1}^1 [I_1(x_i + u, y_i + v) - \bar{I}_1(x_i, y_i)][I_2(x'_j + u, y'_j + v) - \bar{I}_2(x'_j, y'_j)]}{\sqrt{\sum_{u=-1}^1 \sum_{v=-1}^1 [I_1(x_i + u, y_i + v) - \bar{I}_1(x_i, y_i)]^2} \sqrt{\sum_{u=-1}^1 \sum_{v=-1}^1 [I_2(x'_i + u, y'_i + v) - \bar{I}_2(x'_i, y'_i)]^2}}} \quad (6)$$

图2为偏振图像特征点匹配过程示意图, 两幅图像通过特征点匹配得到正确的匹配点对后, 采用仿射变换方法, 利用所求匹配点计算图像变换参数, 具体计算表达式为:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1 & b_1 & c_1 \\ a_2 & b_2 & c_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (7)$$

其中, $\begin{bmatrix} a_1 & b_1 & c_1 \\ a_2 & b_2 & c_2 \end{bmatrix}$ 为仿射变换模型中的变换参数, (x, y) 和 (x', y') 为原始图像和变换后得到的新图像中的坐标点。给互相关系数 K_{NCC} 设置一个给定的阈值, 结合已求得的匹配特征点, 确定变换模型参数, 然后, 利用双线性插值原理, 对采样后构成的数字图像的灰度值重新采样。



a) I^0 图像特征点示意图

The image feature points of I^0 diagram



b) I^1 图像特征点示意图

The image feature points of I^1 diagram

图2 偏振图像特征点匹配过程

Fig. 2 The feature point matching process of polarization image

特征点精细匹配及参数变换计算步骤如下:

- 1) 根据式 (7) 仿射变换参数表达式可知有 6 个未知参数, 任选 3 个初始匹配特征点对 (C_m^3) , 构成代数方程, 通过式 (7) 即可计算其中一组模型变换参数数值 $P_i(a_1, b_1, c_1, a_2, b_2, c_2)$ ($1 \leq i \leq C_m^3$)。
- 2) 选取其他特征点对匹配点, 如 $[(x, y), (x', y')]$ 。获取 (x', y') 在满足变换参数 P_i 的对应坐标点 (x'', y'') 。然后以 (x'', y'') 为中心通过式 (6) 求取 (x'', y'') 和 (x, y) 之间的互相关系数 K_{NCC} , 并判断其值是否满足 $K_{\text{NCC}} > T$ (T 为所设置的阈值), 若满足, 则说明 $[(x, y), (x', y')]$ 满足参数 P_i 。
- 3) 根据以上步骤, 寻找符合所有满足参数 P_i 的初始特征点对, 并对其数量进行统计, 设为 sum_i 。

4) 选择完所有的特征点对后, 根据 $\text{sum} = \max(\text{sum}_i) (0 \leq i \leq C_m^3)$, 寻找特征点数数量的最大值 sum , 其对应的 P_i 即为最终仿射变换参数。

2.2 偏振图像大气光参数计算

本方法实现的原理为首先分离有雾图像的景物和天空区域, 然后对天空部分亮度进行统计分析, 取其最大值, 因此可以不受图像上其他目标景物的影响而准确估算大气光数值。

雾天获取偏振景物图像时, 目标光线在从景物到传感器的传播过程中有较强的散射作用, 从而使所获取的雾霾偏振图像中天空部分的灰度值较高, 并且变化值都在一定范围之内, 如图 3 所示。

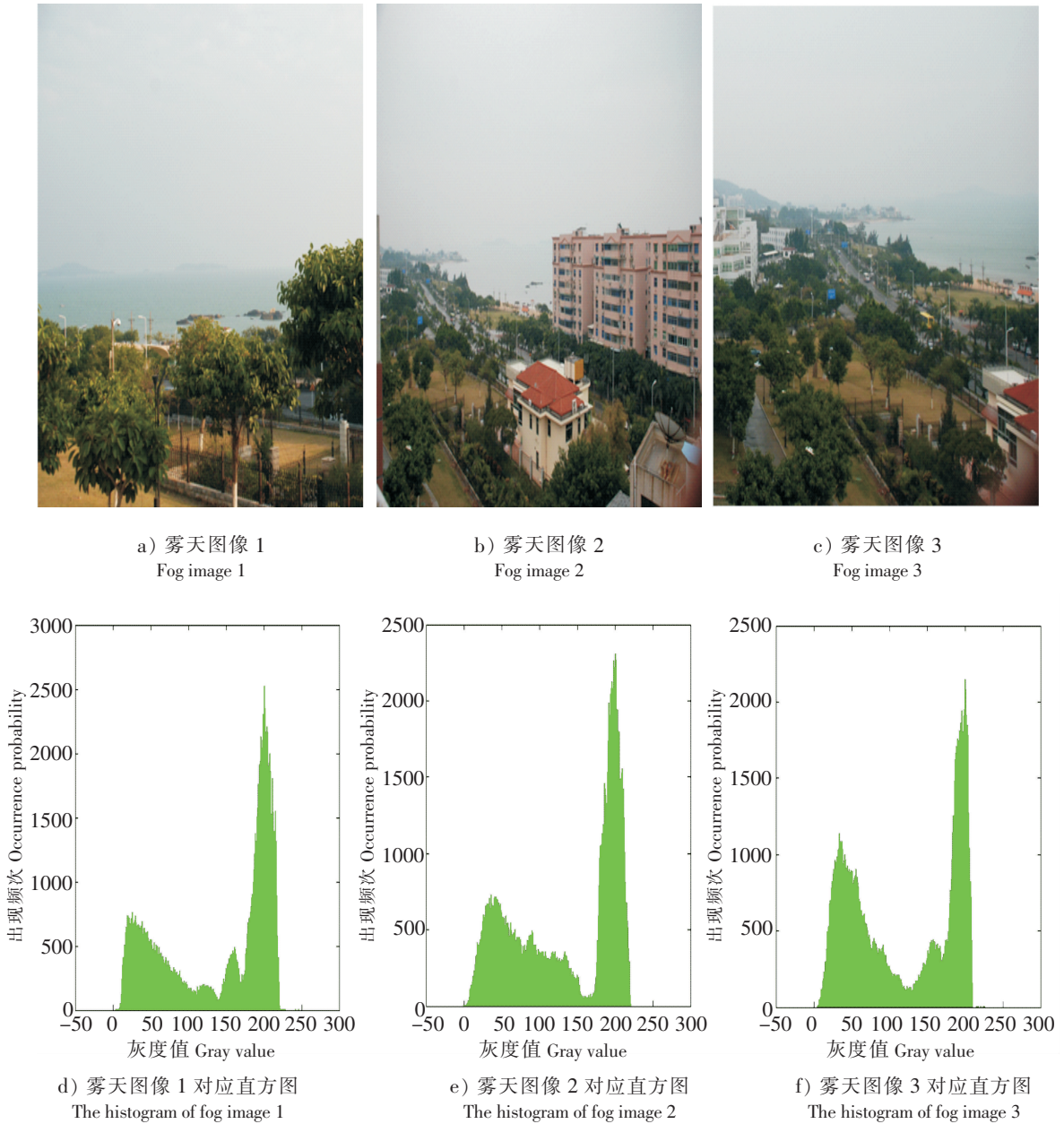


图 3 雾天图像及其对应直方图
Fig.3 Fog image and histogram

因此, 若要实现雾天图像景物部分和天空部分的有效分离, 需要结合雾天图像灰度值的分布情况。本研究采用的方法是: 一, 利用边缘检测方法粗分割雾天偏振图像天空部分; 二, 由于偏振图像

天空部分深度基本一致, 图像的灰度值应近似正态分布, 于是寻找最佳近似正态分布, 从而细分分离雾天图像天空部分。

由于 Sobel 算法边缘检测效率更高^[14-15], 可以有效保留雾霾图像的真实边缘。因此, 本文用该算子实现对模糊图像天空部分的粗分割。

通过分析可知, 由于雾天模糊图像天空部分满足灰度值近似正态分布原理, 因此在粗分割雾天图像的基础上, 采用最佳近似正态分布搜索方法细分分割天空部分。具体实现过程为: 扫描雾天图像灰度直方图, 方向为从右向左, 寻找直方图最高峰值点, 并设为 (h_{\max}, p_{\max}) 。建立初始正态分布, 其灰度均值 μ 为峰值最高点的灰度级数横坐标 ($\mu = h_{\max}$), 任意给定标准差 σ 得到如下初始正态分布表达式 $y = p_{\max} e^{-(h-\mu)^2/2\sigma^2}$, 其中 p_{\max} 为幅值。

计算灰度分布与正态分布曲线的偏差 r_d , 通过搜索找出两条曲线之间偏差的最小方差 $\hat{\sigma}$ 即为最佳近似正态分布的方差。 $r_d = \sum_{h=0}^{255} |y(h, \sigma) - p(h)|$, $J(\hat{\sigma}) = \min \left\{ \sum_{h=0}^{255} |y(h, \sigma) - p(h)| \right\}$, 其中, h 为灰度值, $p(h)$ 和 $y(h, \sigma)$ 分别为高斯函数在第 h 个灰度级的灰度频数和其上的取值。分离天空区域部分后, 通过取分离图像的天空部分亮度最大值作为近似大气光 A_{∞} 的数值。

2.3 偏振图像环境光参数计算及图像复原原理

基于大气散射物理模型的偏振成像的原理, 雾天偏振成像方程为:

$$I^{\text{total}}(x) = D + A = L(x)t(x) + A_{\infty}(1 - t(x)). \quad (8)$$

由此可知, 式 (8) 的后半部分表示环境光模型, 代表了从物体表面反射的光线在到达成像设备的过程中随着成像距离的增加而呈现指数减少趋势。根据光学原理, 当光波经过物体表面反射之后, 其偏振态将发生改变, 对于线性偏振系统, 有:

$$I^{\text{total}}(x) = I''(x) + I^{\perp}(x), \quad I'' = D/2 + A'', \quad I^{\perp} = D/2 + A^{\perp}, \quad A = A^{\perp} + A'',$$

其中 I'' 和 I^{\perp} 分别表示所获取的偏振化方向为 0° 和 90° 的两幅偏振图像, A'' 和 A^{\perp} 表示不同偏振化方向的两幅偏振图像所对应的环境光数值。对 I'' 、 I^{\perp} 在 R 、 G 和 B 三个通道中进行最小化操作, 可得:

$$\begin{cases} \min_{c \in \{R, G, B\}} (I''^{(c)}) = \min_{c \in \{R, G, B\}} (L^c)t(x)/2 + A''(x), \\ \min_{c \in \{R, G, B\}} (I^{\perp(c)}) = \min_{c \in \{R, G, B\}} (L^c)t(x)/2 + A^{\perp}(x). \end{cases}$$

根据暗通道先验理论定义, 对于无雾清晰图像的暗原色通道 $\min_{c \in \{R, G, B\}} (L^c)$ 的像素亮度值很低, 趋近于 0。现假设根据暗通道理论的近视等效, 对于方程式中存在的误差细节信息设为 $n(x)$, 因此可得到如下方程:

$$\begin{cases} A''(x) = \min_{c \in \{R, G, B\}} (I''^{(c)}) + n''(x), \\ A^{\perp}(x) = \min_{c \in \{R, G, B\}} (I^{\perp(c)}) + n^{\perp}(x), \end{cases}$$

其中 $n''(x)$ 和 $n^{\perp}(x)$ 分别表示在暗通道情况下偏振化方向分别为 0° 和 90° 所对应的误差信息, 它和表达式中的 $A''(x)$ 、 $A^{\perp}(x)$ 是分别相互独立的。因此, 本文采用自适应维纳滤波方法来对两幅偏振图像的环境光模型进行估算, 从观察信号 $\min_{c \in \{R, G, B\}} (I''^{(c)})$ 、 $\min_{c \in \{R, G, B\}} (I^{\perp(c)})$ 中恢复期望信号 $A''(x)$ 、 $A^{\perp}(x)$ 。

以其中一个选定的偏振化方向为例, 来具体阐述使用该原理求解环境光深度图。设 $V(x) = A''(x)$ 、 $d(x) = \min_{c \in \{R, G, B\}} (I''^{(c)}(x))$, 因此有: $V(x) = d(x) + n(x)$ 。根据二维离散 Wiener 滤波器的计算方法^[16], 可以对 $V(x)$ 在采样窗口内进行估算, 具体估算表达式为:

$$\hat{V}(i, j) = E + [(e^2 - v^2)/e^2][V(i, j) - E],$$

其中, $\hat{V}(i, j)$ 为环境光深度图估算值; $V(i, j)$ 和 E 分别表示偏振图像像素点 (i, j) 所对应的灰度值及其邻域窗口的局部灰度均值; e^2 和 v^2 分别为像素点 (i, j) 邻域窗口内的局部方差和误差细节信息的方差。

本文假设误差信息方差 v^2 为恒定数值以及 V 和 n 互不相关, 且 n 的均值为 0, 且 $d(x)$ 方差远小

于 v^2 ，因此可以取 v^2 为局部方差 e^2 均值的 λ 倍（ λ 根据具体情况进行取值，本文经过多次实验测试取 $\lambda = 1.1$ ）。 M 表示偏振图像像素总数，则

$$v^2 = (\lambda/M) \sum_{x=0}^{M-1} e^2(x)。$$

(9)

根据上述自适应二维维纳滤波方法对两幅偏振图像的环境光深度图 A'' 、 A^\perp 分别进行估算后，根据 $A = A^\perp + A''$ ，并结合偏振图像 I'' 、 I^\perp 及所求得的大气光 A_∞ ，再根据偏振图像复原方程（4），最终实现偏振图像复原。

3 有雾偏振图像复原实验结果主客观评价分析

本文采用 MATLAB 7.5 仿真平台进行实验测试，验证上述偏振图像复原算法的有效性。两幅偏振输入图像在经过图像配准、融合及基于自适应维纳滤波的偏振图像复原算法计算之后，去雾的效果显著。如图 4 所示，共列出 3 组实验结果，在结果图片中从左至右分别列出最佳偏振状态下的原始输入图像 I'' 、环境光深度图、基于单幅图像的暗通道方法^[3]的复原图像以及本文的偏振融合滤波算法的复原图像。由于篇幅问题，最差偏振状态下的图像未列出。从图 4 可知，采用本文的偏振图像融合滤波算法去除薄雾可以取得更好的效果，特别是在远景方面，可以看到远景山上的轮廓边缘及天空云彩更为清晰，图像中景物的颜色也更加逼真。这是由于本实验所采用的偏振图像信息量较为丰富，并且本文提出的估算偏振雾天图像中大气光的方法结合了自适应滤波方法，且对参数进行了调整，从而得到该复原效果更好的实验结果。在本实验结果的图片中，由于偏振复原方法结合了配准和融合方法，因此在复原结果的图片边缘会有黑色的边缘，这是配准融合后的影响，不影响对实验结果的评价判断。

对图 4 的实验结果，本文采用人眼主观视觉评价及图像客观评价两种方法进行评价。从偏振图像复原图可以明显看出，雾霾天图像中远方山脉及天空中的云朵等雾霾景象脉络清晰可见，还原效果较好。为了对图 4 复原的结果图片进行客观评价并比较分析本文算法和 He 算法^[3]，本文采用了平均梯度和信息熵两个评价指标。

表 1 为分别采用 He 算法^[3]和本文算法对单幅图像和偏振图像的复原测试结果进行客观评价的比较情况。从表 1 中的数据可以看出，本文算法不仅在主观视觉上可以明显看出图像雾霾去除的效果，在客观指标上也能较好地改善平均梯度和信息熵两个评价指标，获得了很好的图像复原效果，而且优化参数避免了暗通道方法中复杂的 soft matting 过程，使计算量较少。由于本研究使用两幅偏振图像，并在图像配准和融合的基础上进行图像滤波复原，这使图像信息量更为丰富，在复原效果方面优于暗通道先验的单幅图像复原方法。

表 1 输入偏振图像和复原图像平均梯度和信息熵对比

Tab. 1 The average gradient comparison of the polarization image and restored image

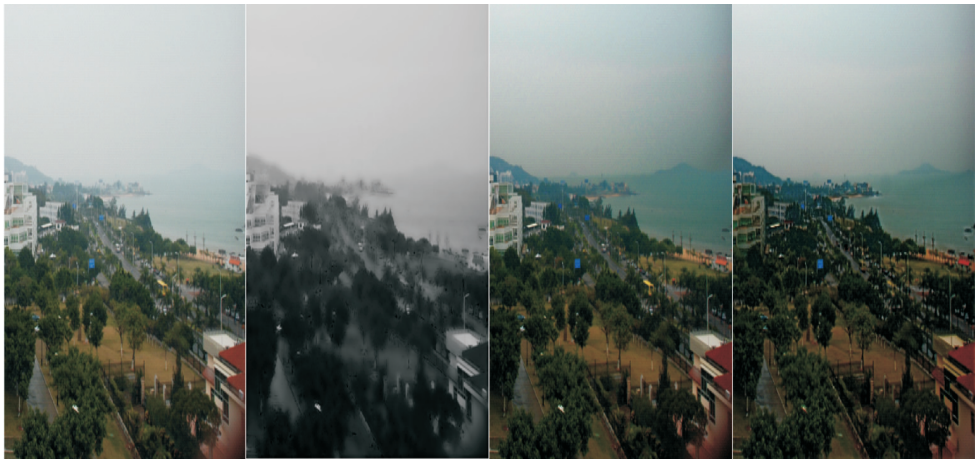
指标 Index	测试结果 Experimental result	偏振图像 I'' Polarization image I''	偏振图像 I^\perp Polarization image I^\perp	He 算法 ^[3] The algorithm by He ^[3]	本文算法 Algorithm of this paper
平均梯度 Averager gradient	结果 1 Result 1	3.40279	3.60132	4.16659	4.50279
	结果 2 Result 2	4.63136	4.73925	5.49645	5.85458
	结果 3 Result 3	3.85405	3.97864	4.53963	4.71376
信息熵 Entropy of information	结果 1 Result 1	13.03380	12.93592	13.80327	14.16758
	结果 2 Result 2	13.52919	13.92000	14.36553	14.56951
	结果 3 Result 3	13.68069	13.25289	14.18321	14.58018



a 实验结果 1 Experimental result 1



b 实验结果 2 Experimental result 2



c 实验结果 3 Experimental result 3

说明:从左至右分别为原始偏振图像 I' 、环境光深度图 A 、暗通道方法^[3]复原结果、本文偏振滤波方法复原结果。
Notes ; From left to right are original polarization image,depth map ,dark channel prior method^[3] results,this polarization restoration method results.

图 4 暗通道单幅图像复原结果及偏振复原结果

Fig.4 The recovery results by dark channel prior and the algorithm in this paper

4 结论

本文在大气散射模型的基础上,利用光的偏振成像优势,研究雾天偏振图像复原原理。通过传感器使用偏振滤镜获得两幅独立的偏振光图像,根据偏振图像融合算法对图像进行配准融合处理,结合最佳正态分布搜索算法及偏振图像自适应维纳滤波方法进行参数估算,最终通过 MATLAB 仿真平台得到偏振光图像的复原结果。从实验结果的主客观指标评价可知,本文的偏振图像复原算法能有效去除图像雾霾,提高图像的清晰度,适用于实际生活中的智能交通及军事侦察等应用领域。但本文算法也存在一定的不足,由于维纳滤波方法是基于最小均方误差准则,是对平稳过程的最优估计,复原过程中会使结果图像中的色彩饱和度偏高。因此,在以后的偏振图像复原过程中,将对该使用局限进行更深入的研究分析并改进算法,以适应更为全面的偏振图像复原领域。

[参考文献]

- [1] GONZALEZ R C, WOODS R E. 数字图像处理 [M]. 阮秋琦, 阮宇智, 等译. 3 版. 北京: 电子工业出版社, 2011: 196-228.
- [2] BURGESS M A, HAYES B D. Synthetic vision-a view in the fog [J]. Aerospace and Electronic Systems Magazine, 1993, 8(3): 6-13.
- [3] HE K, SUN J, TANG X. Single image haze removal using dark channel prior [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence, 2010, 33(12): 2341-2353.
- [4] HE K, SUN J, TANG X. Guided image filtering [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2013, 35(6): 1937-1409.
- [5] 程守洙, 江永之. 普通物理学: 第三册 [M]. 5 版. 北京: 高等教育出版社, 2001: 245-277.
- [6] SCHECHNER Y Y, NARASIMHAN S G, NAYAR S K. Instant dehazing of images using polarization [C] //Proceeding of CVPR. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2001: 325-332.
- [7] SCHECHNER Y Y, NARASIMHAN S G, NAYAR S K. Polarization-based vision through haze [J]. Applied Optics, 2003, 42(3): 511-525.
- [8] NARASIMHAN S G, NAYAR S K. Vision and the atmosphere [J]. International Journal of Computer Vision, 2002, 48(3): 233-254.
- [9] 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.
- [10] NARASIMHAN S G, NAYAR S K. Chromatic framework for vision in bad weather [C] //Computer Vision and Pattern Recognition, 2000 Proceedings, IEEE Conference on. Hilton Head Island, SC: IEEE, 2000: 598-605.
- [11] 李玲玲. 像素级图像融合方法研究与应用 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2005.
- [12] 涂春萍, 柴亚辉, 李广丽, 等. 一种基于 Harris 角点特征精确匹配的图像拼接方法 [J]. 实验室研究与探索, 2011, 30(10): 40-43.
- [13] 张晓玲, 许炎, 王晓忠, 等. 基于薄雾偏振特效的图像融合方法 [J]. 厦门大学学报 (自然科学版), 2011, 50(3): 520-524.
- [14] 何春华, 张雪飞, 胡迎春. 基于改进 Sobel 算子的边缘检测算法的研究 [J]. 光学技术, 2012, 38(3): 323-327.
- [15] 任俊, 李志能, 傅一平, 等. 薄雾天气下图像的复原与边缘检测研究 [J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2003, 17(4): 109-112.
- [16] JAE S L. Two-dimensional signal and image processing [J]. Englewood Cliffs, 1990, 34(1): 6-8.

(责任编辑 朱雪莲 英文审校 黄振坤)