



基于偏振的暗通道先验去雾

霍永胜

Polarization-based research on a priori defogging of dark channel

Huo Yong-Sheng

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 71, 144202 (2022) DOI: 10.7498/aps.71.20220332

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220332>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于散斑光场偏振共模抑制性的宽谱散射成像技术

Broadband scattering imaging technology based on common-mode rejection of polarization characteristic

物理学报. 2021, 70(22): 224203 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210703>

基于Q-plate的双图像非对称偏振加密

Q-plate based dual image asymmetric polarization encryption

物理学报. 2019, 68(8): 084202 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20181902>

浅海被动水下偏振成像探测方法

Passive underwater polarization imaging detection method in neritic area

物理学报. 2018, 67(18): 184202 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180692>

偏振成像激光雷达与短波红外复合光学接收系统设计与分析

Design and analysis of polarization imaging lidar and short wave infrared composite optical receiving system

物理学报. 2020, 69(24): 244202 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200920>

低维半导体偏振光探测器研究进展

Recent progress in polarization-sensitive photodetectors based on low-dimensional semiconductors

物理学报. 2019, 68(16): 163201 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20191002>

不依赖激发光偏振方向的芯帽异构二聚体

Core-cap heterodimer independent of polarization direction of excitation light

物理学报. 2022, 71(3): 037801 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20211381>

基于偏振的暗通道先验去雾*

霍永胜†

(中北大学, 仪器科学与动态测试教育部重点实验室, 太原 030051)

(2022 年 2 月 25 日收到; 2022 年 4 月 28 日收到修改稿)

基于暗通道先验去雾的图像增质方法在目标探测中表现良好, 但其以光强信息为载体, 光学维度单一的不足导致其目标表征效能下降. 本文借助偏振对物理属性的敏感特性, 提出在传统暗通道先验去雾方法中引入偏振信息来增强不同物体之间的辨识程度. 研究了暗通道先验去雾方法中退散射与偏振探测的理论, 并搭建机械式偏振滤波成像设备在雾天环境对所提方法的目标表征功能进行了实验验证. 研究表明, 基于偏振的暗通道先验去雾方法能够同时获取物体的光强与偏振信息, 与传统暗通道先验去雾方法相比, 利用目标与背景的偏振差异能够明显地提高二者对比度. 此研究结果可应用于现有的偏振成像仪器系统, 实现退散射与偏振信息的实时提取, 进一步提高雾天目标探测与表征的效率.

关键词: 偏振, 暗通道先验去雾, 目标表征, 退散射

PACS: 42.25.Ja, 42.30.-d, 42.30.Sy, 42.30.Va

DOI: 10.7498/aps.71.20220332

1 引言

随着污染的日益严重和环境的逐渐恶化, 雾霾天气呈现出影响范围大、出现频率高的特点. 在雾天环境中, 散射效应导致光传输强度衰减与传输方向发生改变, 光学成像系统所获取的图像质量降低. 图像退化使得自身包含的信息难以被有效挖掘与处理, 在目标探测辨识方面造成了一定程度的干扰^[1-3]. 为抑制光散射效应对成像过程的影响, 研究者在图像去雾领域开展了诸多工作.

在过去的几十年里, 人们研发了多种图像去雾方法. 由去雾过程中所使用图像的数量可以大致分为两类. 一种是单幅图像去雾方法, 通过对光学系统采集的图像进行增强或复原操作, 提高图像质量. 如直方图均衡化技术^[4]、小波变换技术^[5,6]以及 He 等^[7-10]提出的先验去雾技术. 但这类方法过度依赖数字化处理, 会模糊图像的轮廓、颜色、区域纹理等视觉特征, 造成图像在局部区域内二次降

质. 另一种是多幅图像去雾方法, 通过对成像系统改造引入多幅图像采集信息, 从而确保关键信息不会丢失. 在该类方法中, 偏振去雾方法被证明是提高模糊图像质量有效的方法^[11-17]. 其中 Schechner 等^[18]最先描述了偏振去雾方法的原理, 同时证明了该方法可以有效提高雾霾图像的质量, 对于图像中的目标特征能很好保留.

本文主要研究暗通道先验去雾方法, 其理论过程简单易行, 至今仍是去雾领域的研究热点. 基于暗通道先验的实时去雾成像方法因其效果良好以及实用性广泛而发展迅速, 但传统暗通道先验去雾方法以光强信息为载体, 仅通过反射率特征对目标进行描述, 单维度光学信息限制了该方法对目标的探测辨别效能^[19-22]. 菲涅耳反射定律^[23]表明, 任何物体在反射光的物理过程中, 都会产生由其自身性质(表面形貌、纹理、含水量、介电常数以及入射光角度)所决定的特征偏振, 因而偏振能够为增强目标特征提供科学依据.

针对以上问题, 本文结合偏振对物理属性敏感

* 国家自然科学基金(批准号: 11847069, 62005251)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: zbdx_hys@163.com

的特性, 将偏振信息引入暗通道先验去雾物理模型, 在退散射基础上综合获取强度与偏振信息对目标特征进行强化, 并通过实验验证了该方法的可靠性. 本文首先介绍了基于偏振的暗通道先验去雾理论, 然后描述了相应的偏振成像与探测装置, 接着分析了偏振引入暗通道先验去雾对图像增质的结果, 并对全文进行总结.

2 偏振暗通道去雾原理

2.1 暗通道去雾模型

暗通道先验去雾方法基于 McCartney^[24] 提出的大气散射物理模型来抑制散射效应对成像过程的影响, 该模型如图 1 所示, 其具体定义为

$$I(x) = J(x)t(x) + A(1 - t(x)), \quad (1)$$

其中, $I(x)$ 是获得的有雾图像, x 是像素的空间坐标, $J(x)$ 是待复原的无雾图像, A 是全局大气光成分, $t(x)$ 表示透射率, 其表达式为

$$t(x) = e^{-rd(x)}, \quad (2)$$

其中, r 为大气散射系数, d 是场景光线的景深.

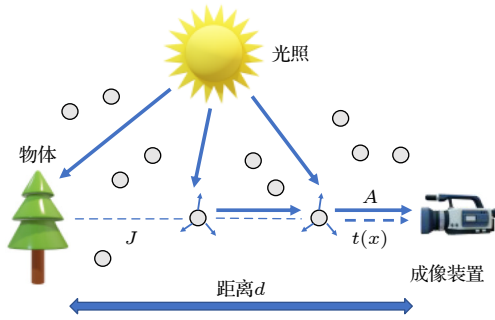


图 1 大气物理退化模型示意图

Fig. 1. Schematic of atmospheric physical degradation model.

由暗原色先验原理^[7]得, 无雾图像的非天空区域, 至少存在一个像素, 其值近似为 0. 对于无雾图像的暗通道可表示为

$$J^{\text{dark}}(x) = \min_{y \in \Omega(x)} \left(\min_{c \in \{R, G, B\}} J^c(y) \right), \quad (3)$$

其中 J^c 表示彩色图像的每个通道, $\Omega(x)$ 表示以像素 x 为中心的一个窗口.

记录暗通道图像中最亮的前 0.1% 的像素点位置, 将所记录的像素点对应到有雾图像 $I(x)$ 中, 再寻找其中最亮的点的值作为大气光 A 的估值. 利用估计的大气光对 (1) 式进行归一化处理:

$$\frac{I^c(x)}{A^c} = t(x) \frac{J^c(x)}{A^c} + 1 - t(x), \quad (4)$$

将 $t(x)$ 作为常数简化为 $\tilde{t}(x)$, 对 (4) 式两边求两次最小值得到:

$$\min_{y \in \Omega(x)} \left(\min_c \frac{I^c(y)}{A^c} \right) = \tilde{t}(x) \min_{y \in \Omega(x)} \left(\min_c \frac{J^c(y)}{A^c} \right) + 1 - \tilde{t}(x), \quad (5)$$

结合暗原色先验原理求解得到透射率 $\tilde{t}(x)$ 的预估值为

$$\tilde{t}(x) = 1 - \min_{y \in \Omega(x)} \left(\min_c \frac{I^c(y)}{A^c} \right), \quad (6)$$

考虑到实际情况下, 空气中的颗粒会对成像系统带来不可避免的影响. 为获得更自然的还原图像, 引入一个数值为 0.95 的因子 ω , 用于保留一定程度的雾. 修正 (6) 式如下:

$$\tilde{t}(x) = 1 - \omega \min_{y \in \Omega(x)} \left(\min_c \frac{I^c(y)}{A^c} \right), \quad (7)$$

同时, 为避免还原图像 $J(x)$ 由于透射率 t 值过小导致整体向白场过度, 引入阈值 $t_0 = 0.1$ 进行修正. 得到的最终恢复公式如下:

$$J(x) = \frac{I(x) - A}{\max(t(x), t_0)} + A. \quad (8)$$

2.2 偏振探测理论

由菲涅耳反射定律可知, 物体会产生由其自身性质 (表面形貌、纹理、含水量、介电常数以及入射角度) 所决定的特征偏振, 利用偏振对物理属性的敏感特性能够强化目标特征, 有利于目标识别.

光偏振态通常由 Stokes 矢量 \mathbf{S} 进行表征:

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} s_0 \\ s_1 \\ s_2 \\ s_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{2}(i_0 + i_{45} + i_{90} + i_{135}) \\ i_0 - i_{90} \\ i_{45} - i_{135} \\ i_r - i_l \end{bmatrix}, \quad (9)$$

其中, s_0 为强度元素, s_1 为 0° 偏振与 90° 偏振的差值, s_2 为 45° 偏振与 135° 偏振的差值, s_3 为右旋偏振与左旋偏振的差值, i 为偏振探测通道. 利用 Stokes 矢量可进一步得到光偏振度参量 P , 其用来表征偏振成分在总光强中所占的比例:

$$P = \frac{1}{s_0} \sqrt{s_1^2 + s_2^2 + s_3^2}. \quad (10)$$

2.3 基于偏振的暗通道去雾原理

将偏振信息引入暗通道去雾模型的物理过程如下. 由偏振理论可知, 基于强度记录的图像均能分解为一对相互正交的偏振图像来表示. 在该理论基础上, (1) 式可进一步表示为

$$I_{//}(x) + I_{\perp}(x) = (J_{//}(x) + J_{\perp}(x))t(x) + (A_{//} + A_{\perp})(1 - t(x)), \quad (11)$$

其中下角标//与 \perp 表示一组相互正交的分量.

同一场景分解得到的正交偏振分量存在相互独立的关系, 在 (11) 式基础上可进一步得到各自偏振通道内的特征信息:

$$I_i(x) = J_i(x)t(x) + A_i(1 - t(x)), \quad (12)$$

其中 i 为相互正交的偏振通道. 基于上述理论分析, 在 0° , 45° , 90° 与 135° 偏振探测通道内获取原始场景的图像信息, 并依次进行暗通道先验去雾. 经处理的图像仍包含相应的偏振信息, 进一步将复原得到的偏振信息与 2.2 节中的偏振探测理论相结合, 对不同目标进行探测.

3 实验系统

3.1 偏振轴标定系统

为减小偏振滤波误差对成像精度的影响, 首先对检偏器的偏振轴方向进行标定, 其原理示意图如图 2(a) 所示. 光波通过偏振型分光棱镜后, 其分解为两束矢量振动方向已知且相互垂直的线偏振光. 由马吕斯定律对线偏振光与检偏器之间的物理作用过程进行表征:

$$I = I_0 \cos^2 \theta, \quad (13)$$

其中 I_0 与 I 分别为入射与透射光强, θ 为入射光矢量方向与偏振轴取向的夹角. 根据 (13) 式可知当透射光强取最大值时, 与之对应的偏振轴取向与入射光矢量振动方向一致, 从而实现对检偏器偏振轴的标定.

偏振轴标定实验装置如图 2(b) 所示. 采用半导体激光器作为光源, 其通过偏振分光棱镜后在两个传输方向产生相互正交的线偏振光, 相应的矢量分别沿水平与竖直方向振动. 将检偏器的偏振轴绕垂直于光传输的方向进行旋转, 变化间隔为 5° , 使用光电探测器记录检偏器输出的变化光强, 并通过示波器进行数据显示. 基于所记录最大与最小光强

位置确定检偏器的偏振轴方向. 为避免激光高亮度对光电探测器产生的饱和影响, 采用线偏振片作为衰减片来控制光路中的激光强度.

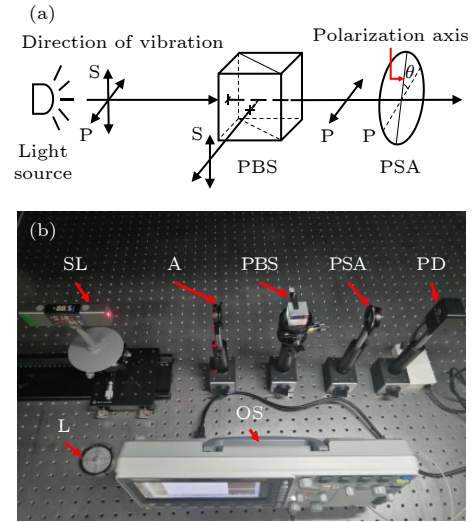


图 2 偏振轴标定系统 (a) 原理图; (b) 系统光路图 SL, 半导体激光器; A, 衰减片; PBS, 偏振型分光棱镜; PSA, 检偏器; PD, 光电探测器; L, 水平仪; OS, 示波器

Fig. 2. Polarization axis calibration system: (a) Schematic diagram; (b) system physical diagram: SL, semiconductor lasers; A, attenuator; PBS, polarization beam splitter cube; PSA, polarization state analyzer; PD, photodetector; L, level; OS, oscilloscope.

3.2 偏振成像装置

用于探测雾天场景偏振信息的成像设备由检偏器与 CCD 相机组成, 采集光路结构如图 3 所示. 沿光传输方向将 3.1 节中已进行标定的检偏器放置于 CCD 相机前方, 其中检偏器偏振轴取向依次

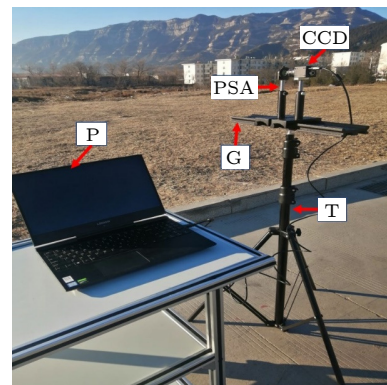


图 3 雾天偏振成像系统 P, 处理器; G, 导轨; PSA, 检偏器; CCD, 工业相机; T, 三脚架

Fig. 3. Polarization imaging system in fog environment: P, processor; G, guideway; PSA, polarization state analyzer; CCD, CCD camera; T, tripod.

设置为 0° , 45° , 90° 与 135° 四个偏振探测通道. 相机位深为 8 bit, 曝光时间为 $1/20$ s. 为减小光电系统自身噪声对探测结果的影响, 采用遮挡相机通光孔的方法进行拍摄, 以此减弱暗电流噪声. 将每一偏振通道拍摄 4 次, 再对采集到的相同偏振通道图像求平均, 以此抑制相机工作不稳定造成的影响.

4 结果与讨论

4.1 偏振轴标定

示波器所记录的电压强度与检偏器偏振轴取向之间的关系如图 4 所示. 其中, 检偏器偏振轴的取向范围为 0° — 180° , 变化间隔为 5° . 为减小示波器自身噪声对测量结果的影响, 对每一偏振轴取向所对应的数值测量 3 次, 并将平均值作为最终测量数据. 所得数据采用傅里叶级数进行拟合, 电压强度在 40.5° 与 130.7° 位置处分别取得最大值 64.08 mV 与最小值 0.08624 mV, 即为偏振轴水平与垂直方向所对应的角度.

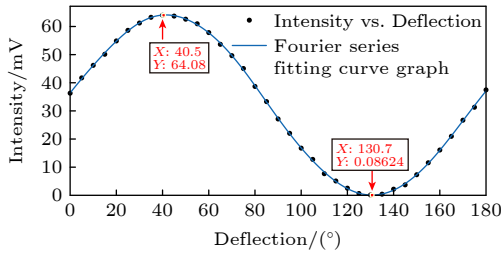


图 4 光电电压强度与偏转角间变换关系拟合曲线

Fig. 4. Fitted curve of transformation relationship between optical voltage intensity and deflection angle.

4.2 偏振暗通道模型稳定性

暗通道先验去雾的关键是利用暗原色先验原理对大气模型简化, 获得所估计的大气光. 在该过程中, 暗通道作为确定大气光像素位置信息的载体尤为重要. 为验证引入偏振信息对暗通道模型具有非破坏性, 对原始场景的偏振暗通道图像与强度暗通道图像进行比较. 在 (3) 式基础上, 将处理后的二维暗通道图像逐行存储为一维行数组, 能够直观表征暗通道像素强度的空间分布特性. 处理结果如图 5 所示, 其中横坐标与纵坐标分别为暗通道图像按行分布的像素位置与像素强度.

由于暗通道图像的一维行数组遵循按行分布的像素排列规律, 使得图像空间位置信息并未丢

失. 对于原始场景, 其 0° , 45° , 90° 与 135° 四个偏振暗通道图像均与强度暗通道图像的分布规律具有一致性. 同时由 (9) 式可知原始场景图的像素强度等于一对相互正交的偏振通道像素强度之和, 其与图中所得结果一致. 上述结果表明暗通道模型对含有偏振信息的图像有效, 因而将偏振信息引入暗通道先验去雾模型具有可行性.

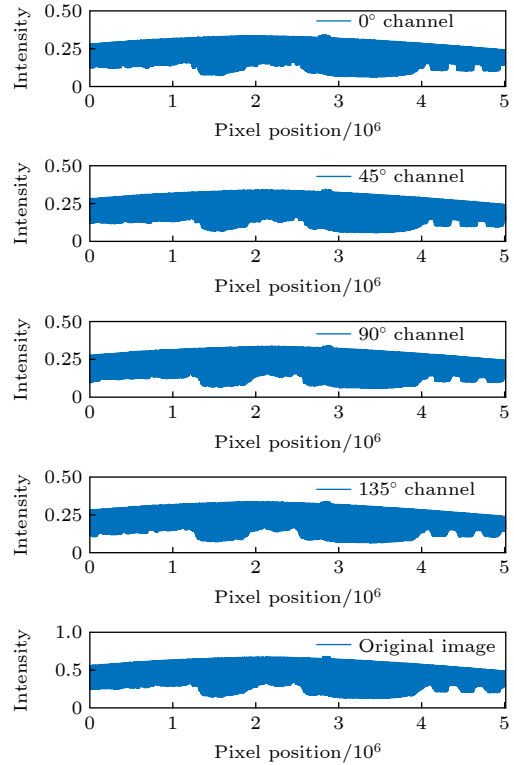


图 5 暗通道像素强度分布规律

Fig. 5. The distribution pattern of pixel intensity in the dark channel.

4.3 偏振先验结果

对雾天场景下采集获得的相同偏振通道图像求平均, 以抑制相机工作不稳定产生随机热噪声的影响. 图 6(a) 分别为 0° , 45° , 90° , 135° 偏振通道的图像, 对其依次进行暗通道先验去雾后, 得到图 6(b). 在图像去雾处理过程中, 暗通道窗口半径为 7.5 像素, 导向滤波半径为 60 像素, 正则化参数为 0.0001. 通过对比图 6(a) 与图 6(b) 可以观察到, 暗通道先验去雾在偏振探测中仍能够有效抑制散射效应对成像的影响来增强图像质量.

进一步以人造目标 (红色方框区域) 与非人造目标 (蓝色方框区域) 为研究对象, 如图 7 所示, 对去雾场景的偏振特性进行定量分析. 经暗通道先验



图 6 除雾前后各偏振通道图像 (a) 原始各偏振通道图像; (b) 去雾后各偏振通道图像

Fig. 6. Images of each polarization channel before and after defogging: (a) Original image of each polarization channel; (b) images of each polarization channel after defogging.

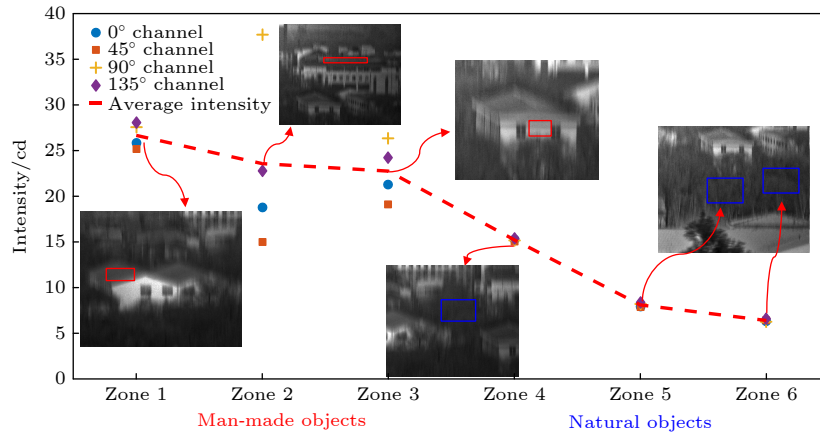


图 7 不同目标对各偏振通道的接受程度

Fig. 7. Acceptance of each polarization channel by different targets.

去雾处理后的图像亮度下降, 不利于体现所选择研究区域的位置信息. 为此, 对截取的子块图像通过缩放的方式优化显示. 为保证实验测量结果的客观性, 以目标区域内 10×10 像素大小的子区域表示该区域. 将子区域内所有像素值求平均后作为该区域强度的计量标准. 对于区域 1, 2, 3 内的人造目标, 其在 0° , 45° , 90° 与 135° 偏振探测通道内的强度分布存在较大差异; 而对于区域 4, 5, 6 内的非人造目标, 其在 0° , 45° , 90° 与 135° 偏振探测通道内的强度分布差异较小, 具有明显的非偏振特征. 具体如表 1 所示, 其中用 P_L (degree of linear polarization) 表示线偏振度.

对于人造目标区域 1, 2, 3, 其强度信息分别为 53.391, 56.469, 47.615, 归一化的偏振信息分别为 0.063, 0.361, 0.152; 对于非人造目标区域 4, 5, 6, 其强度信息分别为 30.452, 16.187, 12.582, 归一化的偏振信息分别为 0.012, 0.035, 0.012. 通过对

上述数据进行分析可知, 暗通道先验去雾方法能够有效地保留与突出图像场景中物体的特征信息, 但其以强度信息为载体, 难以区分反射率特性相接近的不同物体, 如图 7 中人造目标区域 3 与非人造目标区域 4. 而将偏振信息引入暗通道先验去雾方法后, 人造目标具有显著的偏振特性, 非人造目标的偏振特征不明显. 这为利用偏振信息从物理上增强雾天环境中的目标特征提供了科学依据, 相应的验证结果如图 8 所示.

表 1 不同区域的偏振信息记录

Table 1. Polarization information in different regions.

偏振参量	人造目标			非人造目标		
	1	2	3	4	5	6
s_0	53.391	56.469	47.615	30.452	16.187	12.582
s_1	0.032	0.334	0.107	0.005	0.017	0.003
s_2	0.054	0.138	0.107	0.011	0.030	0.012
P_L	0.063	0.361	0.152	0.012	0.035	0.012

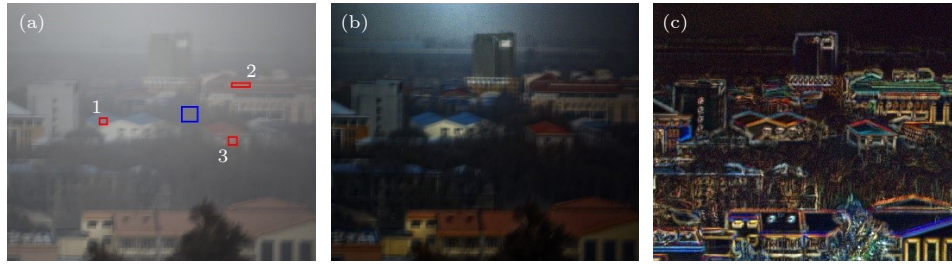


图 8 不同方案效果对比 (a) 原始场景图像; (b) 去雾后场景图像; (c) 偏振度图像

Fig. 8. Comparison of scheme effects: (a) Original scene image; (b) scene image after defogging; (c) image of polarization degree.

图 8(a), (b) 分别为原始场景图像、暗通道先验去雾图像. 图 8(c) 为基于偏振的先验暗通道去雾图像, 其利用偏振度参量对偏振信息进行编码. 通过观察可知, 相比于原始场景图像, 暗通道先验去雾方法能够有效地抑制散射噪声对光学成像过程的影响, 但其基于强度信息的图像表达方式使得目标与背景之间的差异并不明显. 而将偏振信息引入暗通道先验去雾图像中时, 基于目标与背景之间的偏振信息差异较大, 两者能够明显地被识别. 利用对比度参数 (C) 来定量表征目标与背景之间的差异程度, 相应的计算公式为

$$\text{Contrast_ratio} = |(n_r - n_0)/(n_r + n_0)|, \quad (14)$$

其中 n_r 与 n_0 分别表示人造目标区域与非人造目标区域的平均强度. 文中所选定的人造目标区域包含 1, 2, 3, 非人造目标区域为 4, 具体的对比度计算结果如表 2 所示.

表 2 不同人造目标与指定自然目标的对比度
Table 2. Contrast between different man-made objects and designated natural objects.

区域	原始图像	先验去雾	偏振先验去雾
1	0.142	0.343	0.406
2	0.012	0.299	0.424
3	0.010	0.217	0.544

区域 4 与选定区域 1, 2, 3 在原始图像的对比度为 0.142, 0.012, 0.010; 经过暗通道先验去雾后的对比度为 0.343, 0.299, 0.217; 经过偏振先验去雾方法后的对比度为 0.406, 0.424, 0.544. 分析上述数据可得, 基于偏振的暗通道去雾方法能增强不同物体的辨识程度, 其对比度为传统暗通道先验去雾所得结果的 1.0—2.5 倍. 同时观察数据可得, 在原始场景中不同目标间对比度越低, 采用该方法取得的效果比传统暗通道先验去雾方法越好, 这进一步证明所提方法可有效解决传统方案具有的不足.

为进一步证明偏振信息增强目标特征的优势, 将图 8 中的各图像褪去色度与浓度成分, 并对图 8(a), (b) 中的光强信息归一化处理后进行对比, 如图 9(a)—(c) 所示. 图 9(d) 中的红色与绿色曲线分别对应于图 9(a), (b) 中红色虚线位置处的归一化光强分布情况, 蓝色曲线对应图 9(c) 中红色虚线位置处的偏振度分布情况. 曲线拐点与相同位置的像素相比, 具有一致的上升趋势. 偏振度编码的信息在不同像素位置处的波动特性相较于强度信息波动更为剧烈, 在 500—1000 像素位置范围内有更多陡峭的峰谷. 该结果表明, 偏振包含物体更加丰富的信息, 能够准确地突出细节特征, 有利于人造目标的识别. 通过上述分析可知, 本文所提方法可以有效地解决传统暗通道先验去雾方法中不同物体因反射率相近而难以辨识的问题.

上述结果表明, 基于偏振的暗通道先验去雾方法能够同步实现图像去雾与增强目标特征, 但其偏振信息的载体为 RGB 三色通道的综合. 因为物体的偏振特征与光谱密切相关, 所以需进一步研究不同颜色通道对目标特征的增强效果, 相应的结果如图 10 所示. 图 10(a)—(d) 依次为去雾后 RGB, R, G 与 B 通道的偏振度图像, 以区域 3 与区域 4 之间的对比度来定量描述不同颜色通道的偏振识别效果差异. 经计算得, 区域 3 在 RGB, R, G 与 B 与颜色通道的偏振度分别为 0.476, 0.445, 0.490 与 0.483, 区域 4 在 RGB, R, G 与 B 与颜色通道的偏振度分别为 0.141, 0.181, 0.116, 0.154. 4 种颜色通道所对应的图像对比度分别为 0.544, 0.422, 0.616, 0.504. 分析上述数据可得 G 颜色通道的图像对比度最高, 这是由于以下物理原因造成: 区域 3 中的人造目标在 G 颜色通道的光强分布较弱, 且表面相对光滑降低了漫反射的程度, 因此在该通道内的偏振度数值较大; 而区域 4 中的背景多为绿色树木且错综交叉分布, 光在传播过程中更多的绿

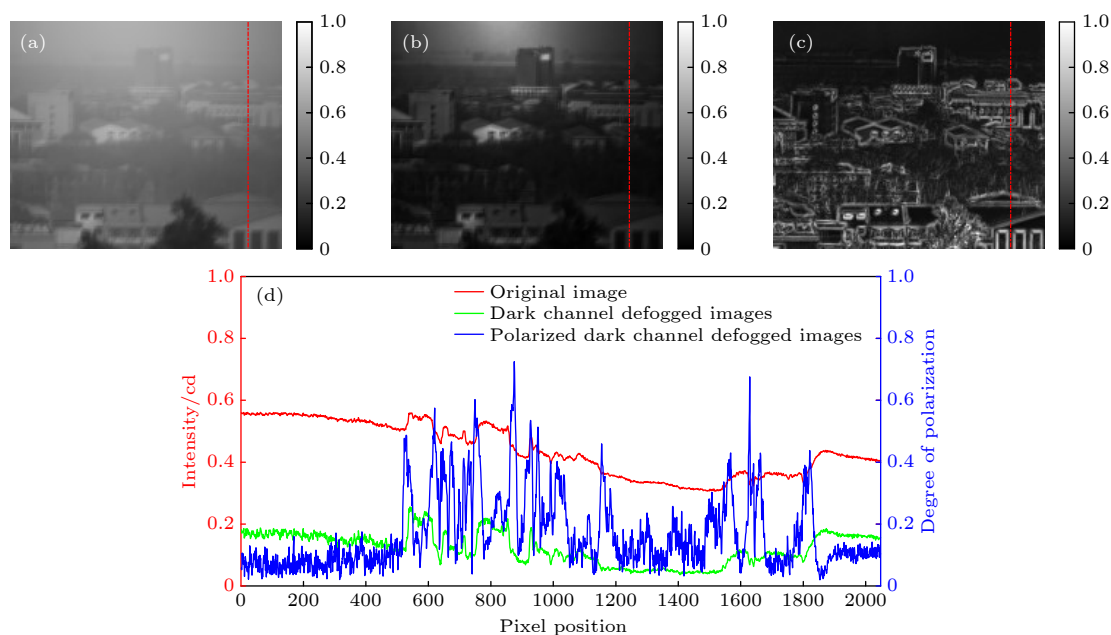


图 9 光强图像与偏振度图像的比较 (a) 原始场景灰度图像; (b) 去雾后场景灰度图像; (c) 偏振度灰度图像; (d) 不同方案的表征能力
Fig. 9. Comparison of light intensity image and polarization image: (a) Original scene grayscale image; (b) scene grayscale image after defogging; (c) polarization grayscale image; (d) characterization capabilities of different programs.

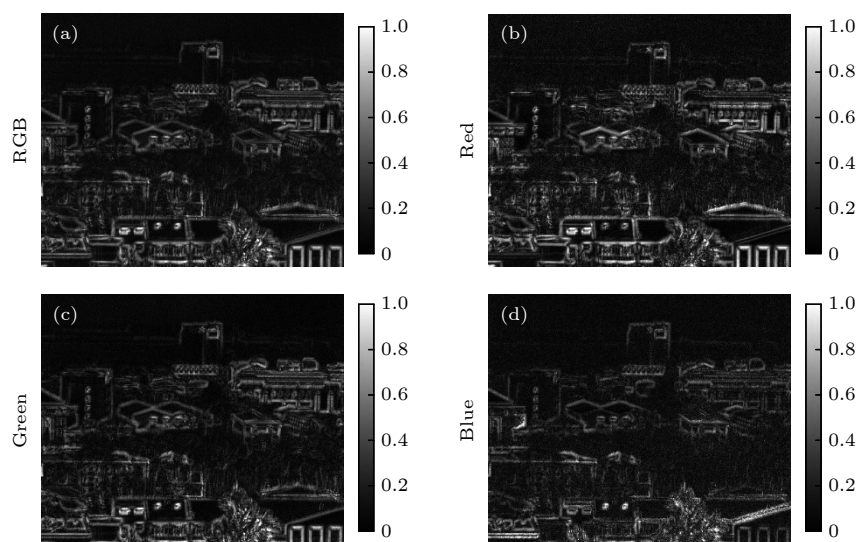


图 10 不同色道偏振度图像 (a) $C = 0.544$; (b) $C = 0.422$; (c) $C = 0.616$; (d) $C = 0.504$

Fig. 10. Images of polarization degree at different color channels: (a) $C = 0.544$; (b) $C = 0.422$; (c) $C = 0.616$; (d) $C = 0.504$.

光成分被反射导致其表面上漫反射的次数增加, 使得 G 颜色通道图像最终呈现退偏振程度增加的特点.

5 结 论

本文利用偏振信息增强暗通道先验去雾方法中目标特征的研究. 结果表明, 所提方法能够同时抑制散射效应对成像影响与获取物体偏振信息; 对于反射率相近的不同物体, 其物理属性不同导致对

偏振的响应特性存在明显差异. 若将本文所提方法与目前的快速分振幅偏振成像仪器相结合, 理论上能够实时地同步进行不同偏振通道内的去雾, 提高探测效率, 这也是本文未来要开展的研究工作.

参考文献

- [1] Yi W J, Liu H B, Wang P, Fu M C, Tan J C, Li X J 2017 *Opt. Express* **25** 7392
- [2] Huang S S 2021 *The 2020 International Symposium on Geographic Information, Energy and Environmental Sustainable*

- Development* Tianjin, China, December 26–27, 2020 p012083
- [3] Song Q, Sun X B, Liu X, Ti R F, Huang H L, Wang H 2021 *Acta Phys. Sin.* **70** 144201 (in Chinese) [宋强, 孙晓兵, 刘晓, 提汝芳, 黄红莲, 王昊 2021 物理学报 **70** 144201]
 - [4] Liu F L, Li G, Yang S Q, Yan W J, He G G, Lin L 2020 *Appl. Spectrosc.* **74** 883
 - [5] Liu X Y, Yang S H, Liao Y Q, Lin X T 2021 *Acta Phys. Sin.* **70** 184205 (in Chinese) [刘欣宇, 杨苏辉, 廖英琦, 林学彤 2021 物理学报 **70** 184205]
 - [6] Duan D Y, Zhu R, Xia Y J 2021 *Opt. Lett.* **46** 4172
 - [7] He K M, Sun J, Tang X O 2011 *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.* **33** 2341
 - [8] He K M, Sun J, Tang X O 2013 *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.* **35** 1397
 - [9] Xu H R, Guo J M, Liu Q, Ye L L 2012 *Proceedings of 2012 IEEE International Conference on Information Science and Technology* Wuhan, China, March 23–25, 2012 p663
 - [10] Zhang W, Dong L, Pan X, Zhou J, Qin J, Xu W 2019 *IEEE Access* **7** 72492
 - [11] Qu Y F, Zou Z F 2017 *Opt. Express* **25** 25004
 - [12] Liang J, Ren L Y, Qu E S, Hu B L, Wang Y L 2014 *Photon. Res.* **2** 38
 - [13] Fang S, Xia X S, Huo X, Chen C W 2014 *Opt. Express* **22** 19523
 - [14] Liang J, Ren L Y, Ju H J, Qu E S, Wang Y L 2014 *J. Appl. Phys.* **116** 173107
 - [15] Schechner Y Y, Karpel N 2005 *IEEE J. Ocean. Eng.* **30** 570
 - [16] Jacques S L, Roussel S, Samatham R V 2016 *J. Biomed. Opt.* **21** 071115
 - [17] Liu F, Sun S J, Han P L, Zhao L, Shao X P 2021 *Acta Phys. Sin.* **70** 164201 (in Chinese) [刘飞, 孙少杰, 韩平丽, 赵琳, 邵晓鹏 2021 物理学报 **70** 164201]
 - [18] Schechner Y Y, Narasimhan S G, Nayar S K 2003 *Appl. Opt.* **42** 511
 - [19] Turner R N, Norris K S 1966 *J. Exp. Anal. Behav.* **9** 535
 - [20] Huang B J, Liu T G, Hu H F 2016 *Opt. Express* **24** 9826
 - [21] Han P L, Liu F, Zhang G, Tao Y, Shao X P 2018 *Acta Phys. Sin.* **67** 054202 (in Chinese) [韩平丽, 刘飞, 张广, 陶禹, 邵晓鹏 2018 物理学报 **67** 054202]
 - [22] Wang C, Fan Z G, Jin H H, Wang X Q, Hua D 2021 *Acta Phys. Sin.* **70** 104201 (in Chinese) [王成, 范之国, 金海红, 汪先球, 华豆 2021 物理学报 **70** 104201]
 - [23] Chen L X, Huang X G, Zhu J H, Li G C, Lan S 2011 *Opt. Lett.* **36** 2761
 - [24] McCartney E J 1977 *Phys. Today* **30** 76

Polarization-based research on a priori defogging of dark channel^{*}

Huo Yong-Sheng[†]

(Key Laboratory of Instrument Science and Dynamic Testing, Ministry of Education,
North University of China, Taiyuan 030051, China)

(Received 25 February 2022; revised manuscript received 28 April 2022)

Abstract

The image enhancement method based on dark channel priori defogging performs well in target detection, but it takes the light intensity information as the carrier and the single optical dimension leads the target characterization efficiency to decline. Based on the sensitivity of polarization to physical properties, in this paper a proposal is made that polarization information is introduced into the traditional dark channel priori defogging method to enhance the recognition degree between different objects. The theory of backscattering and polarization detection in dark channel priori defogging method is studied, and the mechanical polarization filtering imaging equipment is built to verify the target characterization function of the proposed method in foggy environment. The research shows that the dark channel priori defogging method based on polarization can obtain the light intensity and polarization information of the object at the same time. Compared with the traditional dark channel priori defogging method, using the polarization difference between the target and the background can significantly improve their contrast. This research result can be applied to the existing polarization imaging instrument system to realize real-time backscattering and polarization information extraction, and further improve the efficiency of target detection and characterization in fog.

Keywords: polarization, haze removal using dark channel prior, target representation, elimination of scattering

PACS: 42.25.Ja, 42.30.-d, 42.30.Sy, 42.30.Va

DOI: 10.7498/aps.71.20220332

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11847069, 62005251) .

[†] Corresponding author. E-mail: zbdx_hys@163.com