

## 一种基于圆偏光的偏振去雾成像优化方法

王 辉,王 进,李校博,胡浩丰,刘铁根

(天津大学 精密仪器与光电子工程学院 光电信息技术教育部重点实验室  
天津大学光纤传感研究所,天津 300072)

**摘 要:** 在经典的偏振成像去雾方法中,后向散射光的偏振度估计值是影响去雾效果的关键。基于圆偏振光在米氏散射介质中良好的保偏特性,提出一种适用于强散射环境下的偏振成像去雾方法。研究不同偏振态的光源照明时,不同散射强度下,CCD 接收到的光场偏振度变化规律,在此基础上提出了一种快速简易的散射光偏振度估计方法。该方法在不增加系统复杂度的情况下,提高了偏振成像去雾的效果。实验结果显示,在强散射条件下文中方法获得的去雾图像 EME 值比传统方法高 20.4%。此外,该方法不需要传统偏振去雾方法中对背景区域的判断,降低了算法复杂度。

**关键词:** 偏振成像; 去雾; 偏振度; 圆偏振光

**中图分类号:** TP75 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201948.1126001

## Optimization for a polarimetric dehazing method based on the circularly polarized light

Wang Hui, Wang Jin, Li Xiaobo, Hu Haofeng, Liu Tiegeng

(Institute of Optical Fiber Sensing of Tianjin University, Key Laboratory of Opto-Electronics Information Technology, School of Precision Instrument & Opto-Electronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

**Abstract:** In a typical polarimetric dehazing method, the estimation of the degree of polarization (DoP) of the backward scattered light is a key factor to affect the dehazing effect. In the present paper, based on the polarization maintaining characteristic of the circularly polarized light in the Mie scattering media, the traditional polarimetric dehazing method was optimized which was suitable for use in the strong scattering environment. The variation patterns of the DoP of the light field received by the CCD, in the light source illuminations with different polarization states and in different densities of the scattering particles, were discussed, based on which a simple and easy method for estimating the DoP of the scattered light was proposed. This method can improve the effect of polarimetric dehazing method, without increasing the complexity of the system. It can be seen from the experiment results that under a

收稿日期:2019-02-05; 修订日期:2019-05-15

基金项目:国家自然科学基金(61775163);国家重大科学仪器设备开发专项(2013YQ030915);  
中国科协青年人才托举工程(2017QNRC001);中国博士后科学基金(2016M601260);  
青岛海洋科学与技术试点国家实验室主任基金(QNLM201717)

作者简介:王辉(1977-),男,讲师,博士,主要从事偏振成像和光纤传感方面的研究。Email:whoptic@163.com

导师简介:刘铁根(1955-),男,教授,博士,主要从事光纤传感、光电检测、图像检测技术方面的研究。Email:tgliu@tju.edu.cn

通讯作者:胡浩丰(1985-),男,副教授,博士,主要从事偏振成像和光纤传感方面的研究。Email:haofeng\_hu@tju.edu.cn

condition of strong scattering, the present method can provide the dehazed images with an EME value being 20.4% higher than that by the traditional method. In addition, in this method, it is not necessary to determine the background region (s) as in the traditional method for polarimetric dehazing, thus lowering the calculation complexity.

**Key words:** polarimetric imaging; dehazing; degree of polarizaion; circularly polarized light

## 0 引言

在海洋科学、遥感监控、生物组织和医药检测等领域中, 散射介质环境下获得清晰图像是一项颇具挑战的工作。尤其在强散射条件下, 后向散射光是影响图像质量的主要因素。在过去的研究中提出了多种方法来降低散射光的影响。目前图像去雾技术主要分为两类, 一类是基于数字图像处理的方法, 如直方图拉伸法、同态滤波法、小波变换法、Retinex 算法、暗通道法等。这类方法处理速度快, 应用范围广, 但是容易造成图像失真。另一类去雾技术基于光场物理退化模型, 反演得到真实场景光强分布, 从而消除散射光影响, 如偏振成像、时域分辨成像、深度估计去雾、偏微分方程法等。偏振成像技术由于结构简单、易于应用, 因此受到研究人员的关注<sup>[1]</sup>。

经过几十年的发展, 偏振成像去雾技术逐渐成为一个独立的研究分支, 取得较好的去雾效果。朱京平等<sup>[2]</sup>通过测量全 Stokes 矢量优化了偏振差分成像 (polarization-difference imaging, PDI) 算法, 实现快速图像去雾。PDI 技术适用于高偏振度目标的识别, 是一种图像增强技术, 可以提高图像对比度, 但不能还原真实的目标光强图。Schechner<sup>[3]</sup>等人在 2003 年基于大气物理退化模型提出的偏振去雾技术, 利用散射光的偏振度 (degree of polarization, DoP) 估算散射光强度, 从而恢复了目标的光强图像, 该方法适用于无偏目标。2009 年, 他们<sup>[4]</sup>针对自然界中广泛存在的低偏环境优化了去雾算法, 得到了较好的去雾结果。目前这已经成为偏振成像去雾方法的经典模型<sup>[5-6]</sup>。

在经典的偏振去雾方法中认为全场景内散射光的 DoP 为常数, 用图像背景区域的 DoP 来估计散射光 DoP。因此, 实际场景中 DoP 的分布范围越大, 误差也越大, 去雾效果越差。文中将利用圆偏光的保偏特性, 优化偏振去雾方法的效果。

## 1 经典偏振成像去雾方法

采用主动照明的方式, 通过调整偏振发生器 (polarization state generator, PSG) 输出任意偏振态的照明光。目标直射光与介质散射光经过偏振分析仪 (polarization state analyzer, PSA) 进入相机。用 Stokes 矢量描述光场的偏振状态, 则进入相机的总光场为:

$$S = S^D + S^B \quad (1)$$

式中:  $S^D$  和  $S^B$  分别表示目标直射光和介质散射光。目标光和散射光的偏振态与入射光近似相同<sup>[7]</sup>, 因此当 PSA 的状态  $T^T$  与散射光偏振态  $S^B$  平行时, 得到最大光强; 当 PSA 方向与散射光偏振方向正交时, 得到最小光强, 分别记为:

$$I_{\max} = \frac{1}{2} T_{\max}^T \cdot S = I_{\max}^D + I_{\max}^B \quad (2)$$

$$I_{\min} = \frac{1}{2} T_{\min}^T \cdot S = I_{\min}^D + I_{\min}^B \quad (3)$$

相机探测的总光强为:

$$I = I_{\max} + I_{\min} = I^D + I^B \quad (4)$$

散射光和目标光的 DoP 可以表示为:

$$p_{\text{scat}} = \frac{I_{\max}^B - I_{\min}^B}{I_{\max}^B + I_{\min}^B}, p_{\text{obj}} = \frac{I_{\max}^D - I_{\min}^D}{I_{\max}^D + I_{\min}^D} \quad (5)$$

总光场的 DoP 为:

$$p = \frac{p_{\text{scat}} I^B + p_{\text{obj}} I^D}{I^B + I^D} \quad (6)$$

记  $\kappa = I^B / I^D$ , 表示散射光强度与目标光强度的比值。散射微粒的密度越高, 目标与相机之间的距离越远, 则  $\kappa$  越大。总光场、散射光、目标直射光的 DoP 之间有如下关系:

$$p = p_{\text{scat}} + \frac{1}{1 + \kappa} (p_{\text{obj}} - p_{\text{scat}}) \quad (7)$$

由此可以看出, 随着  $\kappa$  增大, 总光场 DoP 逐渐趋近于  $p_{\text{scat}}$ 。联立公式(2)~(5)可以得到目标图像<sup>[4]</sup>:

$$p_D = \frac{I_{\min}(1+p_{\text{scat}}) - I_{\max}(1-p_{\text{scat}})}{p_{\text{scat}} - p_{\text{obj}}} \quad (8)$$

式中:  $I_{\max}$ 、 $I_{\min}$  光强值通过实验测量得到;  $p_{\text{scat}}$  和  $p_{\text{obj}}$  通过先验信息和算法估计得到。它们估计误差会降低图像的去雾效果。 $p_{\text{scat}}$  的估计值表示为  $\hat{p}_{\text{scat}} = \varepsilon p_{\text{scat}}^{\text{true}}$  时, 去雾图像估计值的相对误差为<sup>[4]</sup>:

$$\delta_D = \left| \frac{1}{\varepsilon} - 1 \right| \kappa \quad (9)$$

当  $\varepsilon > 1$  时, 误差变化相对缓慢。因此高估  $p_{\text{scat}}$  对去雾带来的误差更小。在真实条件下  $p_{\text{scat}}$  数值是空间的函数  $p_{\text{scat}}(x, y)$ 。减小  $p_{\text{scat}}$  的估计误差, 是偏振去雾成像质量的关键。根据上述分析, 为了减小  $p_{\text{scat}}$  估值带来的误差, 最佳  $\hat{p}_{\text{scat}}$  应该满足:

$$p_{\text{scat}}^{\text{mean}} < \hat{p}_{\text{scat}} < p_{\text{scat}}^{\text{max}} \quad (10)$$

根据公式可以得到目标区域总光场 DoP  $p_{\text{sum}}$  随  $\kappa$  变化的规律, 如图 1 所示。蓝色表示  $p_{\text{scat}}$  范围, 红色表示  $p_{\text{sum}}$  范围。自然条件下  $p_{\text{obj}}$  一般较小, 即考虑  $p_{\text{obj}} < p_{\text{scat}}^{\text{min}}$  和  $p_{\text{scat}}^{\text{min}} < p_{\text{obj}} < p_{\text{scat}}^{\text{max}}$  两种情况。从图 1 可以看出, 对于不同的目标, 图像场景中的偏振度始终低于  $p_{\text{scat}}^{\text{max}}$ 。 $\kappa$  越大, 总光场的偏振度分布越接近散射光分布。

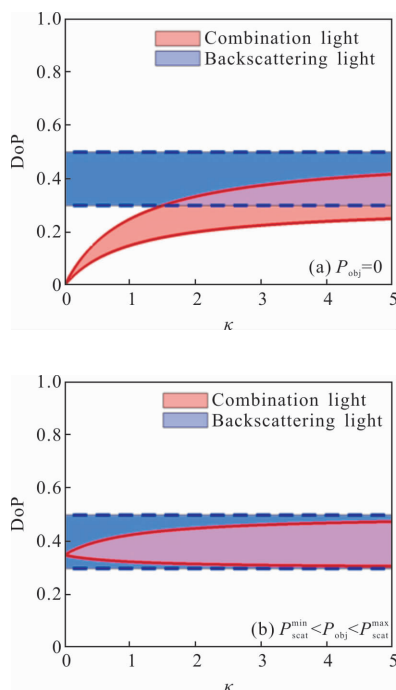


图 1 图像偏振度分布随散射强度的变化

Fig.1 Image DoP distribution varying with density of scattering particles

由于在测量过程中无法直接获得  $p_{\text{scat}}(x, y)$  的取值范围, 只能得到  $p_{\text{sum}}(x, y)$  的取值范围, 即图 1 中红色区间, 因此用  $p_{\text{sum}}(x, y)$  来估算  $p_{\text{scat}}$ 。在强散射环境下, CCD 接收到的散射光强远大于目标直射光, 即  $\kappa \gg 1$ , 从图 1 可以看出, 此时总光场 DoP 的上限曲线会落在  $p_{\text{scat}}$  的取值范围内, 略小于  $p_{\text{scat}}^{\text{max}}$ 。因此用总光场最大 DoP 值  $p_{\text{scat}}^{\text{max}}$  来估算  $p_{\text{scat}}$ , 它满足公式的描述。

## 2 偏振散射光特性实验研究及分析

根据上述分析, 在不需要背景的条件下找到了  $p_{\text{scat}}$  的估算方法, 而影响去雾效果的另一个因素是场景内散射光 DoP 的变化范围。 $p_{\text{scat}}(x, y)$  变化范围大, 则估计误差大, 图像去雾效果则差, 因此提高散射光的偏振参量均匀性是另一个提高去雾效果的关键因素。下面用不同偏振特性的光源进行偏振散射光 DoP 分布研究实验。

实验采用的偏振成像系统见图 2。用准直红光 LED (Thorlabs, M625L3) 作为光源, 光束直径 10 cm, 光束经过 PSG 调制后照射到容器中。容器中为稀释的牛奶溶液, 其中放置了目标。PSG 和 PSA 都是由一个线偏振片 (Thorlabs, LPVISE200-A) 和一个四分之一波片 (Thorlabs, WPQ20ME-633) 组成。相机 (Stingray, F-033B) 镜头前安装 633 nm 的滤光片 (大恒光电, GCC-202004)。实验在暗室中进行, 排除杂散光干扰。通过调整 PSG 状态, 用不同偏振态的光作为光源, 得到场景内 DoP 分布。实验发现线偏振光和圆偏振光的 DoP 分布差异最大。

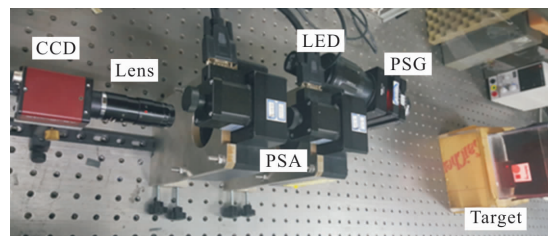


图 2 偏振去雾成像实验装置图

Fig.2 Diagram of device for polarimetric dehazing imaging experiments

在不同浓度下, 目标与 CCD 之间的散射介质对光的散射强度不同, 用这段距离上对应的散射事件次数  $N$  来表征物体前介质对光的散射强度。把  $N$  作

为横坐标,图像 DoP 作为纵坐标,得到图 3。其中红

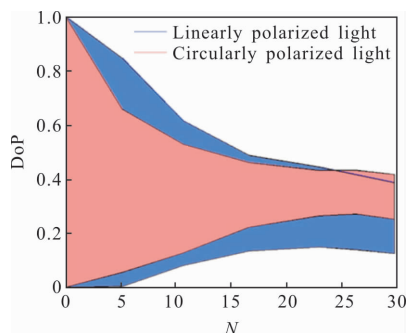


图 3 偏振图像 DoP 分布区间随散射介质厚度的变化

Fig.3 Polarized image DoP distribution intervals varying with thickness of scattering media

色和蓝色区域分别表示圆偏光和线偏光作为照明光源时的总光场 DoP。在这个实验中,场景中放置多种材料目标,包括高保偏的金属、高退偏的毛面塑料、偏振片。参考理论分析结果图 1 可以看出,文中实验结果图 3 与理论相符。实验结果分析如下: $N=0$  表示没有散射介质影响, $p_{\text{sum}}(x,y)$  的分布为真实物体 DoP 分布。随着  $N$  增大,总光场  $p_{\text{sum}}(x,y)$  取值范围越来越接近散射光。在图 3 中任意浓度下,圆偏振光照明时 DoP 取值范围都小于线偏振光照明下的图像。随着溶液浓度增加,圆偏光图像 DoP 取值范围收缩得更快,且数值高于线偏光,这是由于圆偏振光的保偏特性优于线偏振光。

### 3 实验结果与分析

根据以上实验结果,采用圆偏振光作为照明光源,利用  $p_{\text{sum}}^{\text{max}}$  估计  $p_{\text{scat}}$  进行了偏振去雾实验。实验的目标为粘贴图样的白色塑料板,目标直径约 5 cm。笔者进行了不同散射强度的实验,实验结果见图 4。此时目标与相机之间的散射事件次数  $N=15$ 。图中第一行为 CCD 采集的原始图像,第二行是传统方法的去雾图像,第三行是文中方法去雾图像。左列为整个场景图像,右列为方框部分局部放大图。

从图 4 可以看出,文中方法得到的去雾图像更清晰。在左侧整体图像中,文中方法去雾图像中的目标对比度更高,箭头所指的心形边界更容易辨识。从右侧方框区域的放大图可以看出,文中方法去雾图像中的边界细节更清晰。

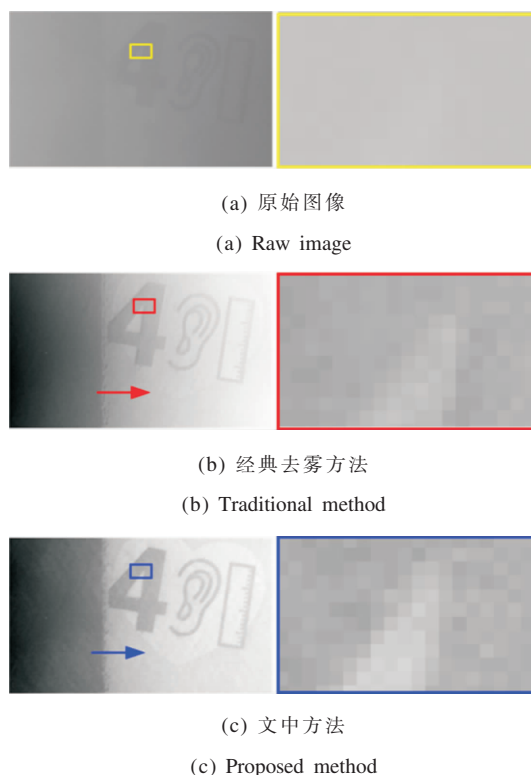


图 4 去雾图像

Fig.4 Dehazed images

为了能够量化去雾效果,文中采用 EME 值<sup>[8]</sup>作为图像去雾评价指标,图像 EME 值越大则图像越清晰。在不同浓度下去雾图像的 EME 值如图 5 所示。横轴表示从目标到相机之间的散射事件次数  $N$ ,纵轴表示图像的 EME 值。红色圆点和实线表示传统方法去雾前后的 EME 值,蓝色圆点和虚线表示文中方法去雾前后的 EME 值。可以看出,在低散射强度下两种方法效果相近,在强散射条件下圆偏光去雾效果更好。在  $N=15$  处,文中方法去雾图像的 EME 值为 4.83,传统方法去雾图像为 4.01,提高 20.4%

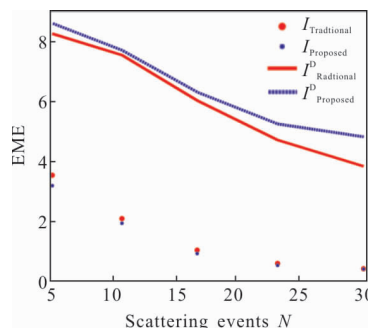


图 5 不同浓度散射介质中原始图像和去雾后图像的 EME 值  
Fig.5 EME values of original images and dehazed images in the scattering media with different concentration



笔者进行了另一组偏振去雾成像实验，目标尺寸和视场范围是上一组实验的两倍，因此  $p_{\text{scat}}$  在全场景内变化范围更大。实验结果见图 6。



(a) 经典去雾方法

(a) Traditional dehazing method



(b) 文中方法去雾图像

(b) Proposed dehazing method

图 6 大视场偏振去雾图像

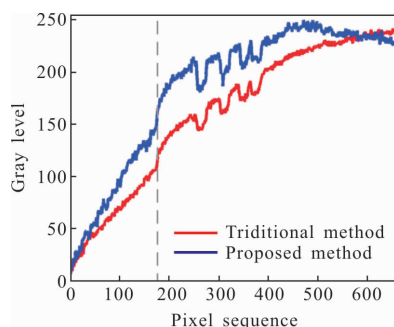


Fig.6 Wide field polarimetric dehazed images

目标白板颜色均匀，因此在原始图像中该区域的灰度值基本相同。在去雾图像上，白板区域的光强从左到右逐渐变大，这是因为从左到右  $p_{\text{scat}}^{\text{ture}}$  逐渐减小。根据公式(9)，当  $\varepsilon \geq 1$  且增加时，对应得到的估计值误差  $\delta_D$  增大，公式中得到的  $I^D$  增加。图 6 曲线图中描述了两种方法去雾图像上虚线标记位置的灰度值。曲线图中灰色虚线右侧为目标区域，在该区域文中方法的光强估计值在 200~255 之间，传统方法的估计值范围在 150~255 之间，传统方法的误差更大。也就是说，相同强度的信号在传统去雾图像中的对比度更低。根据两区域对比度定义  $R=(I_a-I_b)/\max(I_a, I_b)$ ，得到传统去雾图像和文中去雾图像中字母“T”与

白板的对比度分别为 0.0686 和 0.0978。文中方法去雾图像的对比度比传统方法提高了 42.6%。

## 4 结论

文中基于圆偏振光的保偏特性，提出一种优化的去雾方法，简化了散射光 DoP 的估计算法，提高了去雾效果，适用于强散射环境下的自然目标探测。实验证明，文中方法的去雾图像与传统偏振去雾图像相比，对比度提高了约 40%，EME 值提高约 20%。此外，文中方法适用于无背景区域的环境，扩展了经典偏振去雾方法的应用范围。

## 参考文献：

- [1] Liang Jian, Ju Haijuan, Zhang Wenfei, et al. Review of optical polarimetric dehazing technique [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(4): 9–21. (in Chinese)
- [2] Tian H, Zhu J, Tan S, et al. Rapid underwater target enhancement method based on polarimetric imaging [J]. *Optics & Laser Technology*, 2018, 108: 515–520.
- [3] Schechner Y Y, Narasimhan S G, Nayar S K. Polarization-based vision through haze [J]. *Applied Optics*, 2003, 42(3): 511–525.
- [4] Treibitz T, Schechner Y Y. Active polarization descattering [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2009, 31(3): 385–399.
- [5] Liu F, Han P, Wei Y, et al. Deeply seeing through highly turbid water by active polarization imaging [J]. *Optics Letters*, 2018, 43(20): 4903.
- [6] Liang J, Ren L, Ju H, et al. Polarimetric dehazing method for dense haze removal based on distribution analysis of angle of polarization [J]. *Optics Express*, 2015, 23 (20): 26146–26157.
- [7] Cula O G, Dana K J, Pai D K, et al. Polarization multiplexing for bidirectional imaging [C]//2005 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR'05), 2005, 2: 1116–1123.
- [8] Hu H, Zhao L, Huang B, et al. Enhancing visibility of polarimetric underwater image by transmittance correction [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2017, 9(3): 1–10.