

偏振光学成像去雾技术综述

梁 健^{1,2}, 巨海娟^{1,2}, 张文飞^{1,2}, 任立勇¹, 屈恩世¹

¹中国科学院西安光学精密机械研究所信息光子学研究室, 陕西 西安 710119;

²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 偏振光学成像技术是一种新型的光学成像技术。通过对光波偏振特性的探测,可以获得其他成像技术难以获得的独特信息,有效地增加信息探测维度。近年来,偏振光学成像技术被证明了可应用于雾霾或其他散射介质中的去雾清晰成像中。随后,偏振光学成像去雾技术作为一个独立的研究分支发展起来,并取得了很多优秀的研究成果。主要介绍了偏振光学成像去雾技术的基本原理、实现途径与算法、国内外研究进展和发展现状。

关键词 成像系统; 偏振成像; 图像增强; 散射介质成像

中图分类号 O436 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201737.0400001

Review of Optical Polarimetric Dehazing Technique

Liang Jian^{1,2}, Ju Haijuan^{1,2}, Zhang Wenfei^{1,2}, Ren Liyong¹, Qu Enshi¹

¹Research Department of Information Photonics, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an, Shaanxi 710119, China;

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract Optical polarimetric imaging technique is a novel kind of optical imaging technique. The unique information is obtained by detecting the polarization characteristic of light, which is unavailable by other imaging techniques. Therefore, this technique can effectively enhance the detecting dimensions. In recent years, the optical polarimetric imaging technique is proved useful in the fields of clear imaging through haze or some other turbid media. Later, the optical polarimetric dehazing methods are developed rapidly as an independent branch, and many achievements are obtained so far. The principles, realization approaches and methods, developments and status quo are fully introduced.

Key words imaging systems; polarimetric imaging; image enhancement; imaging through turbid media

OCIS codes 110.5405; 100.2980; 110.0113

1 引 言

随着污染的日益严重和环境的逐渐恶化,雾霾等不良气象环境正呈现出影响范围广、持续时间长和浓度大等特点。雾霾天气不仅对人体健康造成很大的伤害,而且对室外光学成像监测具有致命的影响,重雾霾天气甚至可以使光学探测系统致盲。在雾霾天气影响下,光学成像系统的能见度和所采集图像对比度均大幅降低,难以对图像中的信息进行有效地处理和分析。因此,如何恢复和提高雾霾气象条件下的光学成像质量,即去雾技术,逐渐成为研究热点。目前,去雾技术主要分为两大类:1)图像处理去雾技术,通过对光学系统采集的图像进行增强或复原操作,提高图像的质量;2)光学去雾技术,通过对光学成像系统的改造和成像算法的优化,减小雾霾对成像质量的影响。

收稿日期: 2016-11-15; **收到修改稿日期:** 2016-12-14

基金项目: 国家自然科学基金(61505246,61535015,61275149)

作者简介: 梁 健(1986—),男,博士研究生,助理研究员,主要从事偏振光学成像技术方面的研究。

E-mail: liangjian@opt.ac.cn

导师简介: 任立勇(1971—),男,博士,研究员,博士生导师,主要从事新型光学成像、微纳光子技术及其应用等方面的研究。E-mail: renliy@opt.ac.cn(通信联系人)

图像处理去雾技术通常可以对单幅雾霾图像进行去雾操作,不需要对光学成像系统进行改造。该类去雾技术主要包含两种技术,分别是图像增强技术和图像复原技术^[1-2]。图像增强技术不考虑图像的降质原因,只提高目标的对比度,该技术适用范围广,可有效改善图像的质量;同时,图像增强技术往往不需要很复杂的算法,处理速度很快。然而,该技术对不同条件下拍摄到的雾霾图像的增强效果差别较大,对目标细节和颜色的恢复能力有限。典型的图像增强技术有直方图均衡化技术^[3]、Retinex 技术^[4]及小波变换技术^[5]等。图像复原技术主要通过建立图像的物理退化模型,依靠先验知识或前提假设对造成图像质量下降的干扰因素进行估计,并反演退化过程,从而减弱甚至消除干扰因素对图像质量的影响,提高图像质量。一般而言,相比于图像增强技术,图像复原技术会得到更自然的去雾图像。然而,该技术的算法通常较为复杂,在对图像进行去雾处理时耗时较长,不适用于实时处理;另外,该技术涉及的先验知识或前提假设大都具有一定的限制条件,使得该技术的应用范围受到了一定的限制。He 等^[6-10]提出的去雾技术都属于典型的图像复原技术。

与图像处理去雾技术不同,光学去雾技术通过对光学成像系统进行改造,采集多幅含有不同光学特征的同场景图像,从多幅图像中获取目标反射光信息和大气光信息并将其分离,进而通过算法融合出一幅复原后的去雾图像。光学去雾技术目前主要分为可见光-近红外融合去雾技术和偏振光学成像去雾技术。可见光-近红外融合去雾技术结合了近红外波段对雾霾较强的穿透能力和可见光彩色输出的优势,通过对采集到的同一场景可见光图像和近红外图像进行融合,实现了彩色图像的去雾处理^[11-12]。该技术中彩色图像和近红外图像均是由硅基探测器采集的,这是因为首先硅基探测器可以响应波长为 700~1100 nm 的近红外光;其次与 InGaAs 探测器相比,硅基探测器具有更高的分辨率,获得的图像质量更高。随着单个相机同时采集可见光和近红外图像技术的逐渐成熟^[13],可见光-近红外融合去雾技术将具有更大的发展空间。但不可否认的是,硅基探测器只能响应较窄的近红外波段,其去雾能力也因此受限。InGaAs 探测器的透雾能力更强,但低的分辨率、单色输出及高昂成本等缺点使其难以广泛用于去雾成像中。另外,水分子对近红外波段的强吸收效应也限制了该技术的应用范围。偏振光学成像去雾技术通过采集同一场景的不同偏振图像,精确估算出大气光的强度并将其从雾霾图像中减掉,再对退化后的场景反射光进行反演处理,最终得到去雾图像。由于雾霾等散射颗粒散射太阳光形成的大气光都具有部分偏振特性,因此,偏振光学成像去雾技术适用于各种场景的各类雾霾天气,应用范围广泛。另外,该技术还具有细节保真度高、处理速度快及成本低廉等优势。

本文从被动和主动两方面对偏振光学成像去雾技术进行介绍。在被动技术部分,从物理退化模型出发,介绍了基于差分成像方法与斯托克斯矢量的被动偏振光学成像去雾的理论和算法;在主动技术部分,介绍了偏振差分与圆偏振两种类型的主动偏振光学成像去雾理论,也介绍了其在其他散射介质中的应用。最后,综述了偏振光学成像去雾技术的国内外最新研究进展。

2 被动偏振光学成像去雾技术

2.1 大气物理退化模型

雾霾气象条件下,到达探测器的光强主要包括两部分:1)场景目标的反射光,也称直接透射光^[14],包含了场景目标的强度信息;2)由雾霾颗粒散射导致的杂散光,也称大气光^[15],是雾霾环境中光学成像的主要干扰因素。

图 1 为雾霾气象的大气物理退化模型示意图^[14-15]。首先,场景目标反射光强 L 经过雾霾区域,会受到雾霾颗粒的强散射和吸收作用,到达探测器的直接透射光强 D 随传输距离指数衰减:

$$D = L \exp(-\beta z), \quad (1)$$

式中 β 是衰减系数, z 是传输距离。一般而言,定义透射率 $t = \exp(-\beta z)$ 。与直接透射光不同,大气光是由雾霾颗粒直接散射太阳光所造成的,其到达探测器时的光强 A 随传输距离指数增加:

$$A = A_{\infty} [1 - \exp(-\beta z)], \quad (2)$$

式中 A_{∞} 是无穷远处大气光强,表示无目标处的大气光强。到达探测器时的总光强 I 是直接透射光强和大气光强的非相干叠加,可表示为

$$I = D + A = L \cdot t + A_{\infty} (1 - t), \quad (3)$$

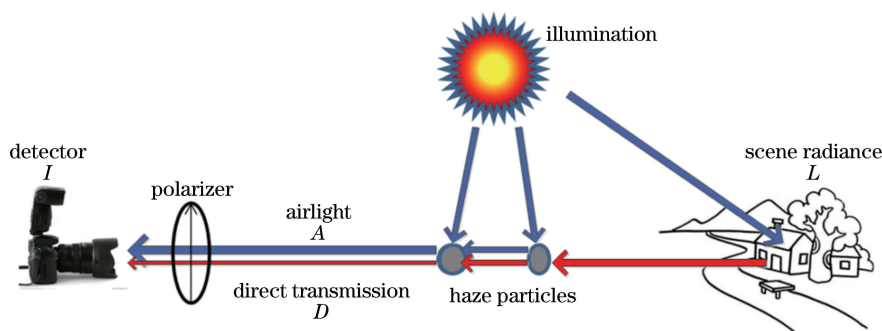


图 1 大气物理退化模型示意图

Fig. 1 Schematic of atmospheric physical degradation model

(3)式表征了雾霾气象环境对直接透射光的影响。根据(1)~(3)式,消去直接透射光强和透射率后,得到目标反射光强为

$$L = \frac{I - A}{1 - A/A_{\infty}}, \quad (4)$$

从(4)式可以看出,只要估算出大气光强和无穷远处大气光强,就可以反演得到雾霾衰减前的目标反射光强。

该雾霾气象物理退化模型可准确地描述雾霾环境中图像的退化过程,偏振光学成像去雾技术和多数的图像复原技术都采用了该模型进行去雾处理,取得了较好的去雾效果。通过考虑目标反射率和目标反射光与大气光的不同衰减系数,可进一步优化该物理退化模型^[3]。

2.2 基于差分成像的偏振去雾技术

雾霾颗粒的成分非常复杂,但主要的构成基本都是以固体杂质为核,外面包裹着直径在微米量级的水滴微粒。可见光在空气分子(直径为 10^2 pm 量级)环境中满足瑞利散射模型,其散射光的偏振特性与方位角关系密切;而在雾霾环境中则满足米氏散射模型,其散射光的偏振特性与方位角关系较小,在任何方位角都具有部分偏振特性^[16]。根据雾霾散射光(即大气光)的这一特性,通过偏振光学探测技术就可以将其精确估算出来。

最早的较为成熟的偏振光学成像去雾算法在 2001 年由 Schechner 等^[17]提出,它是基于偏振差分成像来实现的,详细的理论和实验报道发表于 2003 年^[14]。为了简化算法,偏振光学成像去雾技术采取了三个近似:1)只考虑雾霾颗粒对目标反射光的吸收作用而不考虑散射作用;2)只考虑雾霾颗粒的单次散射作用而不考虑多次散射作用;3)对远距离目标成像时,假设大气光为部分偏振光而直接透射光为非偏振光。在实际操作中,将一片线偏振片放置于可见光强度相机镜头前,用于检测大气光的偏振成分。在旋转线偏振片的过程中,图像将呈现明暗变化,根据第三条近似,该变化由大气光的偏振部分所导致。大气光强与偏振片旋转角之间的关系如图 2 所示。当图像的亮度达到最亮和最暗时分别进行图像采集,此时得到了大气光对图像影响最大和最小的两幅偏振图像,记作 I_{\perp} 和 I_{\parallel} ,如图 3 所示。图像最亮时表示大气光强比重大,图像质量最

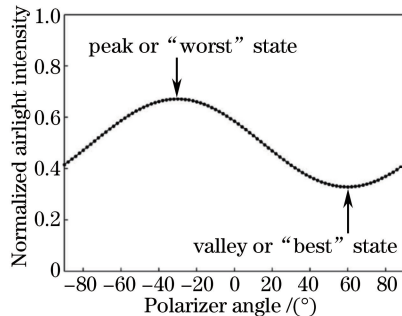


图 2 大气光强与偏振片旋转角度之间的变化关系^[19]

Fig. 2 Relationship between airlight intensity and rotational angle of the polarizer^[19]

差;图像最暗时表示大气光强比重小,图像质量最好。最亮和最暗图像的判断方法目前有主观判断^[14]、液晶滤波器快速扫描^[18]和斯托克斯矢量估算^[19]等。这里需要注意的是,通过对该两幅正交图像进行差分成像就可以达到去雾的目的^[20];同时,也可以更精确地估算大气光强,得到更自然的去雾效果。



图 3 同一场景的最亮(a)和最暗(b)偏振图像^[14]

Fig. 3 Brightest (a) and darkest (b) images in the same scene^[14]

对大气光的偏振特性无目标处的大气光强 A_∞ , 反映到图像当中即为天空区域的总光强, 即

$$A_\infty = I_{\text{sky}} = \frac{1}{2}(I_{\perp\text{sky}} + I_{\parallel\text{sky}}), \quad (5)$$

式中 I_{sky} 表示的是图像中天空区域的光强。根据偏振差分成像理论, 偏振度 p 定义为

$$p = \frac{I_{\perp} - I_{\parallel}}{I_{\perp} + I_{\parallel}}. \quad (6)$$

因为在天空区域没有直接透射光的影响, 即 $I = A$, 所以天空区域计算得到的偏振度就是大气光偏振度 p_A , 即

$$p_A = \frac{A_{\perp} - A_{\parallel}}{A_{\perp} + A_{\parallel}} = \frac{I_{\perp\text{sky}} - I_{\parallel\text{sky}}}{I_{\perp\text{sky}} + I_{\parallel\text{sky}}}, \quad (7)$$

这里需要注意的是, 因为只考虑雾霾的单次散射作用, 因此认为图像中每一像素点位置的大气光偏振度都是一样的。根据计算得到的大气光偏振度, 就可以求出图像每一像素点的大气光强为

$$A = \frac{I_{\perp} - I_{\parallel}}{p_A}. \quad (8)$$

还需要说明的是, 将大气光强全部从雾霾图像中去掉将会使图像的景深信息发生畸变, 从而影响观察。为了保持去雾后图像的景深, 需要对大气光偏振度乘以一个偏置系数 ϵ ($1 \leq \epsilon \leq 1/p_A$) 以调整大气光强。

根据(5)和(8)式, 得到了去雾所需的两个关键参数无穷远处大气光强和各像素点的大气光强, 进而根据(4)式可获得去雾图像。图 3 对应的去雾图像如图 4 所示。



图 4 对图 3 去雾处理后的效果图像^[14]

Fig. 4 Dehazing result of Fig. 3^[14]

偏振差分成像去雾技术在提出后经过多年的优化和完善, 现在已经发展成一种比较成熟的去雾技术, 其应用领域也得到了扩展。首先, 该技术中关键参数估算都依赖于天空区域的判断, 天空区域的选取是该技术的一个关键问题。文献[18]讨论了天空区域位置的选择方法, 并认为靠近水平线附近的天空区域得到的偏振参数更准确。按照文献中的判断方法得到的天空区域如图 5 所示。图 5(a)为最暗图像, 其中天空中的斜线标记为所选择的天空区域。图 5(b)为根据该区域选择的参数去雾效果。文献[21-23]讨论了没有天空背景时的参数估算方法并给出了实验结果。其次, 该技术的第三个假设直接透射光为非偏振光的近似条件在

很多场景中是不适用的。文献[18,24-25]深入讨论了这个问题,并给出了结合直接透射光偏振特性的偏振差分成像去雾技术。另外,文献[26-30]在偏振差分成像去雾技术的基础上,结合了图像处理去雾技术,得到了较好的去雾效果,也证明了该技术可以很好地应用于水下去散射成像应用领域^[25,31-32]。浑浊水下的硬币偏振去雾效果和偏振差分去雾技术在水下的实验结果分别如图 6 和图 7 所示。

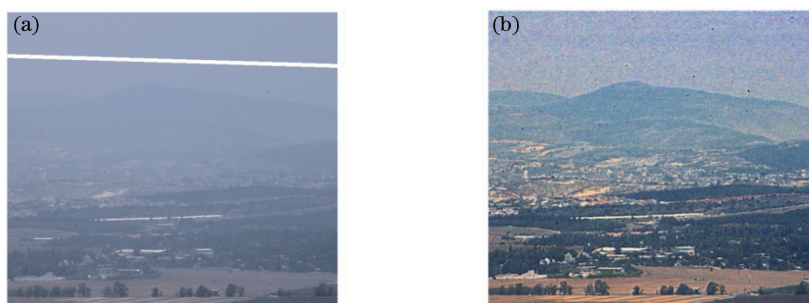


图 5 (a) 最暗图像; (b) 去雾效果^[18]

Fig. 5 (a) Darkest image; (b) dehazing result^[18]

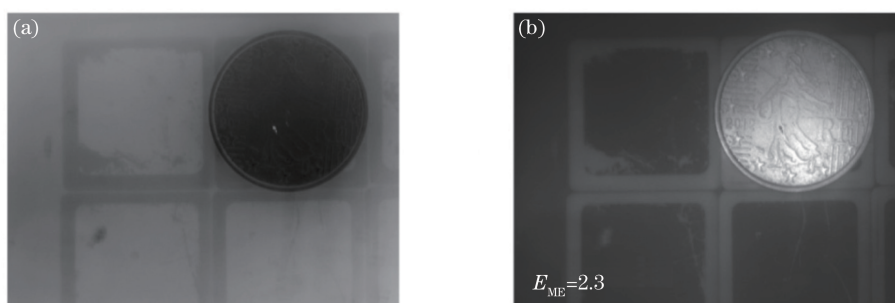


图 6 浑浊水下的硬币偏振去雾效果图^[25]。(a) 未考虑直接透射光的偏振态; (b) 考虑直接透射光的偏振态

Fig. 6 Dehazing results of coin in turbid water^[25]. (a) Without the consideration of polarization state of direct transmittance; (b) with the consideration of polarization state of direct transmittance

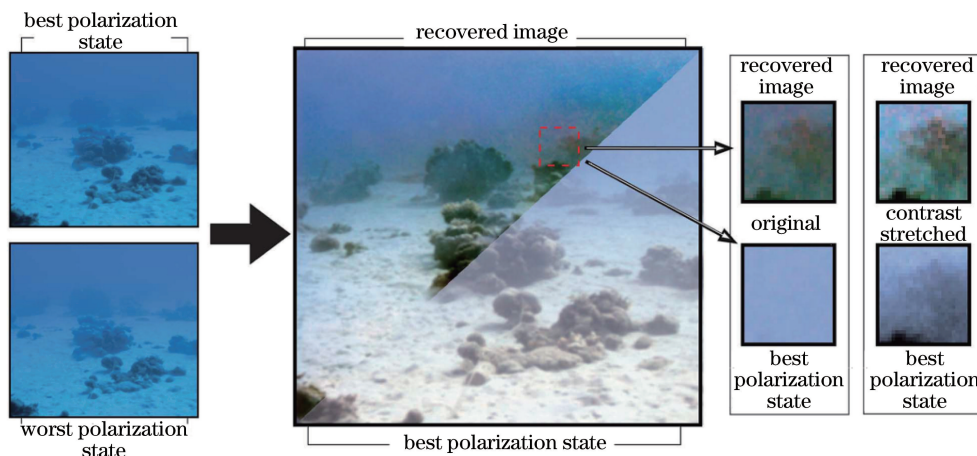


图 7 偏振差分去雾技术在水下的实验结果^[32]

Fig. 7 Experimental results of underwater by polarimetric differential dehazing technique^[32]

2.3 基于斯托克斯矢量的偏振去雾技术

1852 年,斯托克斯提出了一种用光的强度信息描述偏振特性的探测方法,使得人们对光偏振信息的观察和获取变得更加直观和方便。该描述方法被称为斯托克斯矢量^[33]。与 Jones 矢量仅适用于描述偏振光不同,斯托克斯矢量可以描述完全偏振光、部分偏振光及自然光,是一个完备的体系^[34]。在 Chandrasekhar 将斯托克斯的研究成果重新整理之后,斯托克斯矢量极大地促进了偏振光学成像技术的发展。

基于斯托克斯矢量的偏振去雾技术与偏振差分成像去雾技术的不同点在于后者只能通过差分图像得到

偏振度信息,而前者不仅可以获得偏振度信息还可以获得偏振角信息,而偏振角信息对去雾模型中关键参数的精确估算起着非常重要的作用。

被动偏振成像去雾技术仅考虑大气光线偏振的影响,因此这里的斯托克斯矢量实际上指的是线斯托克斯矢量。想要获得斯托克斯矢量,必须探测不同偏振旋转角的 3 幅或 4 幅图像(例如 0° 、 60° 和 120° ^[35], 或者 0° 、 45° 、 90° 和 135° ^[36])。这里以 4 幅图像为例来说明基于斯托克斯矢量的偏振去雾技术过程^[36-37]。

首先,采集偏振方向分别为 0° 、 45° 、 90° 和 135° 的 4 幅图像,如图 8 所示。分别记作 $I(0)$ 、 $I(45)$ 、 $I(90)$ 和 $I(135)$, 则斯托克斯矢量可表示为

$$\begin{cases} S_0 = I(0) + I(90) \\ S_1 = I(0) - I(90) \\ S_2 = I(45) - I(135) \end{cases}, \quad (9)$$

式中 S_0 是场景的总光强,即 I ; S_1 是水平方向和垂直方向的强度差; S_2 是 45° 和 135° 方向的强度差。

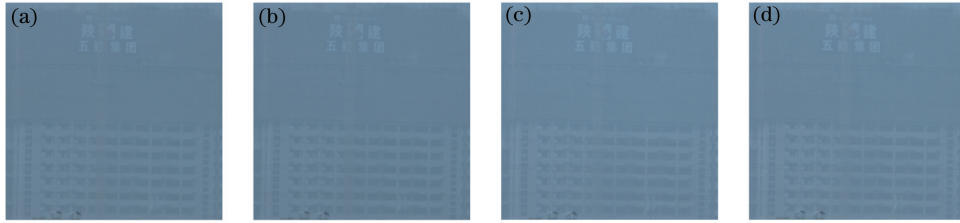


图 8 (a)~(d) 分别是偏振片旋转 0° 、 45° 、 90° 和 135° 时采集的 4 幅图像^[36]

Fig. 8 (a)-(d) Images captured with rotational angle of the polarizer 0° , 45° , 90° and 135° , respectively^[36]

根据(9)式,可以得到偏振度 p 和偏振角 θ 的表达式分别为

$$p = \frac{\sqrt{S_1^2 + S_2^2}}{S_0}, \quad (10)$$

$$\theta = \frac{1}{2} \arctan \frac{S_2}{S_1}. \quad (11)$$

对(10)和(11)式进行比较,可以发现偏振度与总强度 S_0 有关,而偏振角与 S_0 无关。在雾霾气象条件下,直接透射光的偏振信息是很微弱的,即使部分区域的直接透射光偏振信息较强,也属于局部信息。从全局变量的角度出发,直接透射光主要存在于 S_0 中,对 S_1 和 S_2 影响很小,也就是说用偏振角来进行大气光的估算可以最大程度地抑制直接透射光的影响。根据(11)式计算图像每一像素点的偏振角值,选择出现概率最大的偏振角值作为大气光偏振角 θ_A 。从满足大气光偏振角的像素中计算偏振度,选取最大值为大气光偏振度 p_A 。

然后,定义 0° 采集角度方向为 x 轴, 90° 采集角度方向为 y 轴,则大气光偏振角与采集角度之间的关系如图 9 所示。图中 E_{Ax}^p 和 E_{Ay}^p 分别表示在 0° 和 90° 时采集到的大气光电场强度, E_A^p 表示大气光电场强度。从图中可以得到电场强度之间的关系,从而可以获得大气光强偏振部分(A_p)之间的关系。 0° 和 90° 方向采集到的大气光强偏振部分分别可以表示为 $I(0) - S_0(1-p)/2$ 和 $I(90) - S_0(1-p)/2$ 。

基于此,可以得到大气光强的偏振部分为

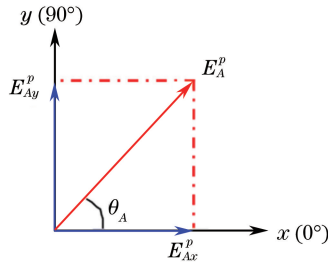


图 9 大气光偏振角与采集角度之间的关系^[36]

Fig. 9 Relationship between the angle of polarization of the airlight and the rotational angle of the polarizer^[36]

$$A_p = \frac{I(0) - S_0(1-p)/2}{\cos^2\theta_A} = \frac{I(90) - S_0(1-p)/2}{\sin^2\theta_A}, \quad (12)$$

进而,可以根据 $A = A_p/p_A$,得到各像素点的大气光强。

最后,在估算无穷远处大气光强时,为了消除天空区域限制,采用了一种近似的方法。对(3)式进行形式上的变换,得到:

$$I = A_\infty + (L - A_\infty)\exp(-\beta z), \quad (13)$$

可以看出,当距离 z 无穷远或 $L = A_\infty$ 时, $I = A_\infty$,即在(没有天空背景(z 不是无穷远时)的情况下,仍然可以估算无穷远处大气光强。同样从强度与偏振角的关系出发, 0° 采集的图像 $I(0)$ 可以表示为

$$I(0) = p_A A_\infty \cos^2\theta_A + \frac{1-p_A}{2} A_\infty + \left[\frac{L}{2} - \left(p_A A_\infty \cos^2\theta_A + \frac{1-p_A}{2} A_\infty \right) \right] \exp(-\beta z), \quad (14)$$

假设图像中每一像素点的 z 都趋于无穷,则从(14)式可以推导图像中每一像素点的 $A_\infty(x, y)$ 为

$$A_\infty(x, y) = \frac{2I(0)}{1 + p_A \cos^2\theta}, \quad (15)$$

对于雾霾图像而言,只有当 $I = A_\infty$ 时,上面的假设才成立,因此将(15)式计算出的 $A_\infty(x, y)$ 与原图像强度进行对比,当二者近似相等时,对应假设成立,该点计算得到的强度即为无穷远处大气光强。该估算方案在无论有无天空背景的雾霾图像中都适用,但在有天空背景的图像中,可以结合暗通道先验原理自动判断天空背景以简化去雾算法^[38]。

根据斯托克斯矢量估算出的大气光强和无穷远处大气光强,最终可以得到去雾图像,如图 10 所示。



图 10 对图 8 去雾处理后的效果图像^[36]

Fig. 10 Dehazing result of Fig. 8^[36]

众所周知,相机的量子噪声会对相机采集图像的强度值有一定的影响。该影响对偏振度的计算影响较小,而对偏振角的计算产生较严重的影响。文献[39]详细地分析了该影响,并提出了一种邻域平均滤波的方案以减少量子噪声的影响,天空区域图像的偏振角概率分布结果如图 11 所示。从图 11 中可以看出,对天空区域而言,滤波前和滤波后的偏振角最大概率处基本一致,但是滤波后的计算结果受量子噪声影响更小,计算得到的偏振角值更精确。另外,插图为天空区域图像各像素的偏振角空间分布。从插图中可以看出,画面中部区域的偏振角值更准确,该结论和文献[18]的结论一致。

文献[40]将基于斯托克斯矢量的偏振成像去雾技术与基于偏振差分的偏振成像去雾技术进行了对比,发现前者在去雾图像对比度复原方面更好。另外,基于斯托克斯矢量的偏振去雾技术在能见度提升方面也具有一定的优势,对于彩色图像偏振去雾而言,能见度可提升 70% 以上^[39];对于硅基探测器的可见光-近红外融合偏振去雾而言,能见度可提升一倍以上^[41]。图 12 所示为可见光-近红外融合偏振去雾实验效果。

3 主动偏振光学成像去雾技术

对于雾霾气象环境而言,一般采用被动偏振光学成像去雾技术,而在其他散射环境,例如水下环境中,其衰减系数要远远高于雾霾环境且环境光照较弱,在这种情况下,采取主动成像方案就成为了比较常规的选择。主动偏振光学成像技术在这种环境中的去散射成像具有一定的优势,在这里也一并称为偏振去雾技术,并简要介绍主动偏振光学成像去雾技术的种类和发展。

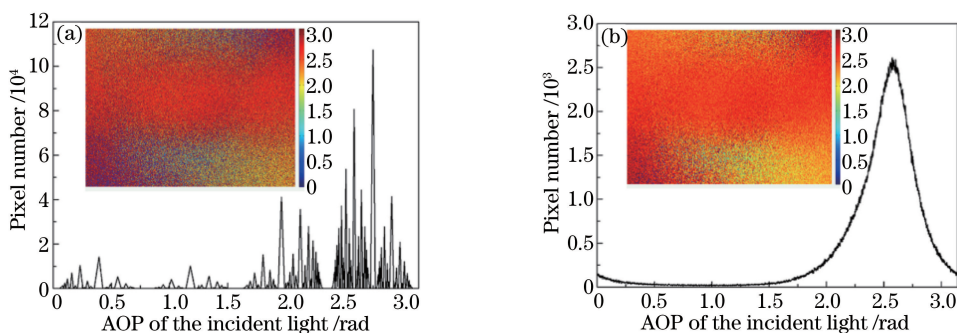


图 11 天空区域图像的偏振角概率分布^[39]。(a) 滤波前；(b) 滤波后

Fig. 11 Distribution of the angle of polarization in the sky region^[39]. (a) Before filtering; (b) after filtering

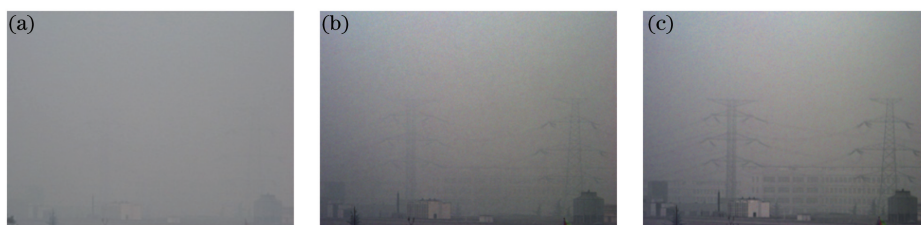


图 12 可见光-近红外融合偏振去雾实验效果。(a) 雾霾图像；(b) 可见光偏振去雾效果；
(c) 可见光-近红外融合偏振去雾效果

Fig. 12 Experimental result of polarimetric dehazing based on visible-infrared image fusion. (a) Hazy image; (b) result by visible polarimetric dehazing; (c) result by polarimetric dehazing based on visible-infrared image fusion

3.1 偏振差分主动光学成像去雾技术

偏振差分光学成像技术的思想主要来源于仿生物学^[42-43],许多生物的眼睛都可以识别光的偏振态,并将其用来作为定位、清晰成像甚至传递信息的工具。偏振差分光学成像去雾技术主要用于对强散射环境中的目标进行清晰成像。

一般而言,生物眼睛感受的仍然是太阳光散射光线的偏振态,因此,在主动偏振去雾技术中用的光源大多数也属于类似太阳光的近朗伯体光源,主要用来提升散射环境的亮度。图 13 所示为一种典型的偏振差分光学去雾实验系统^[44-45]。图中左侧 CCD 相机前面依次放置了窄带滤波器 F,检偏器 A 和扭转向列型液晶 (TNLC),这个结构就是按照仿生物学设计的;右侧为朗伯体光源;中间部分为散射介质(例如稀释的牛奶)和目标。和

如图 13 所示,在光经过散射介质入射进 CCD 相机的过程中,光经过 TNLC,其偏振态旋转 90°;然后经

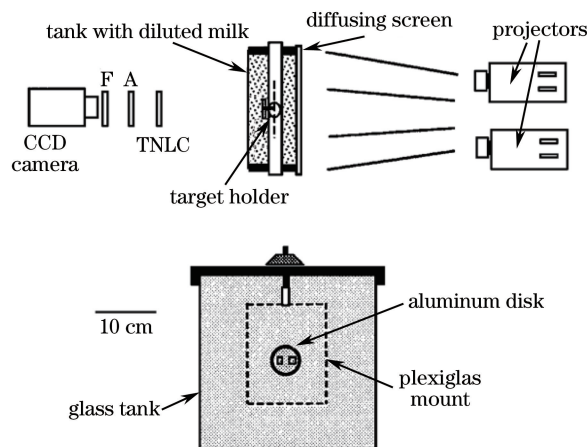


图 13 一种典型的偏振差分光学去雾实验系统^[44]

Fig. 13 A classic experimental system of orthogonal polarimetric dehazing^[44]

过检偏器 A, 选择出特定的光偏振方向; 再经过中心波长为 610 nm、带宽为 10 nm 的窄带滤波器 F, 此中心波长和带宽的选取主要为了配合 TNLC 的工作波段; 最后入射进 CCD 相机。当 TNLC 打开时, 采集图像 I_{\parallel} ; 当 TNLC 关闭时, 采集图像 I_{\perp} 。通过采集到的这一组图像, 可以得到偏振差分图像:

$$I_{PD}(x, y) = I_{\parallel}(x, y) - I_{\perp}(x, y) \quad (16)$$

该偏振差分图像可有效提升散射介质中目标的对比度。当散射介质的散射作用很强时, 目标反射光的偏振特性被抑制, 导致差分图像的细节仍难以分辨, 此时需要对差分图像进行强度仿射变换来凸显细节信息。图 14 所示为图 13 的实验结果: 图 14(a) 和 (b) 分别表示 I_{\parallel} 和 I_{\perp} ; 图 14(c) 表示图 14(a) 和 (b) 的和, 即强度图像; 图 14(d) 表示偏振差分图像 I_{PD} ; 图 14(e) 和 (f) 分别表示进行强度仿射变换后的强度图像和偏振差分图像。从图 14 中可以看出, 经过强度仿射变换后的偏振差分图像可以分辨出强度图像难以分辨的目标。该方案认为整幅图像的偏振差异是一致的, 但是实际上整幅图像的各部分偏振差异并不是均匀的, 文献 [46] 详细地分析了该现象, 并优化了偏振差分去雾算法。

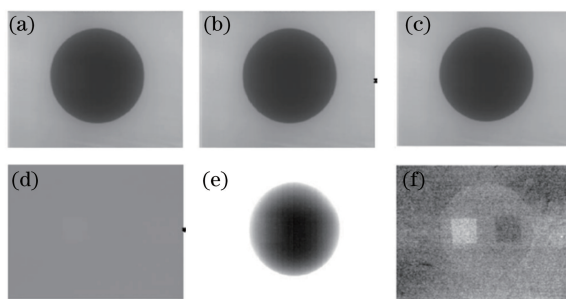


图 14 (a) I_{\parallel} ; (b) I_{\perp} ; (c) 强度图像; (d) 偏振差分图像; 强度仿射变换后的 (e) 强度图像和 (f) 偏振差分图像^[44]

Fig. 14 (a) I_{\parallel} ; (b) I_{\perp} ; (c) intensity image; (d) differential image; (e) intensity image and (f) differential image after affine transform^[44]

图 13 所示的偏振差分实验系统依靠 TNLC 控制采集的偏振方向, 属于分时系统。文献 [47-48] 改进了偏振差分实验系统, 可同时采集两偏振方向的图像。图 15 所示为双 CCD 相机的同时偏振差分光学成像系统, 通过偏振分光棱镜将两正交偏振态分离, 然后由两个 CCD 相机同时接收, 实现同时探测^[47]。图 16 所示为基于双折射渥拉斯顿棱镜 (WP) 分光的偏振差分实验系统, 用单 CCD 相机同时接收两偏振方向的图像^[48]。文献 [47] 采用了非偏振光源; 文献 [48-50] 则在实验中采用了线偏振光源。文献 [51-52] 对光偏振特性对成像质量的影响进行了分析。这些偏振差分实验系统都证明了偏振差分光学成像技术具有很好的去雾能力。

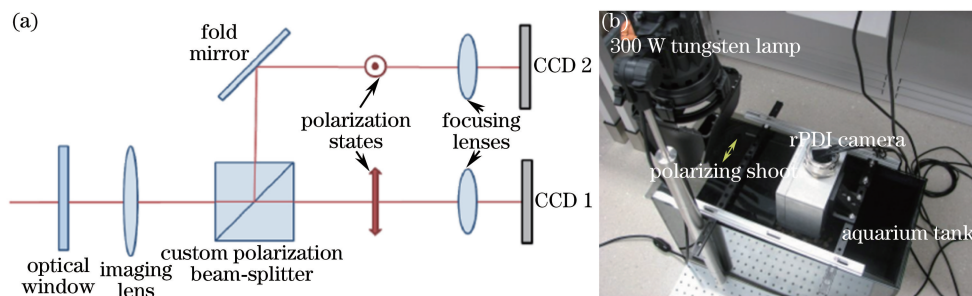


图 15 双 CCD 相机的偏振差分光学成像系统^[47]。(a) 系统光路图; (b) 系统实物图

Fig. 15 Polarimetric differential imaging system with dual CCD cameras^[47].

(a) Scheme of the system; (b) photograph of the system

3.2 圆偏振光学成像去雾技术

圆偏振光学成像去雾技术主要是基于圆偏振记忆效应进行的^[53-54]。圆偏振记忆效应指的是在米氏散射条件下, 圆偏振光的背向散射光容易保持其圆偏振特性; 而线偏振光的背向散射光则退偏严重, 且散射颗粒尺寸越大退偏效果越明显。基于圆偏振记忆效应, 采用圆偏振光主动照明散射介质中的目标, 并只接收反射光的圆偏振信号, 就可以有效抑制背景噪声, 达到清晰成像的目的。该方法需要目标反射光到达探测器的时刻进行采集, 因此通常与距离选通成像技术相结合。

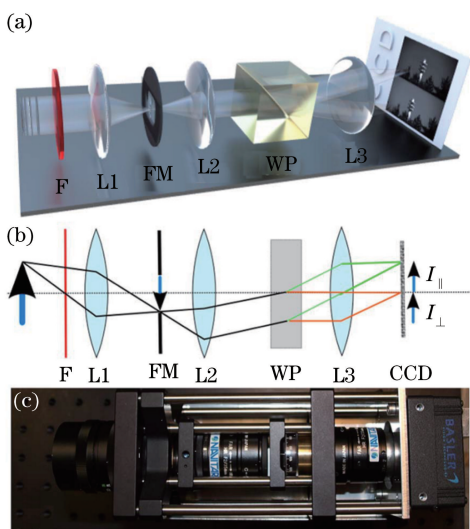


图 16 基于双折射渥拉斯顿棱镜分光的偏振差分实验系统^[48]。

(a) 正视投影图；(b) 系统光路图；(c) 系统实物图

Fig. 16 Polarimetric differential imaging system based on birefringent Wollaston prism^[48].

(a) Front view of projection ; (b) scheme of the system ; (c) photograph of the system

典型的圆偏振光学成像系统^[55]如图 17 所示。图中由激光器出射的线偏振光经过可调波片变成圆偏振光；经过扩束之后由反射镜入射至散射介质(例如聚苯乙烯悬浊液)中的目标上；从目标反射的圆偏振光经 1/4 波片变成线偏振光再经检偏器后由 CCD 相机采集。

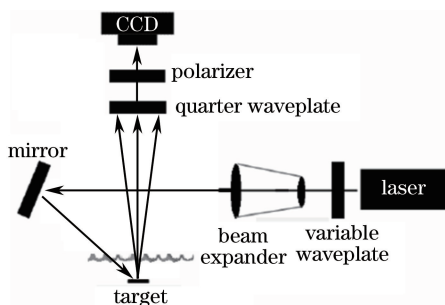


图 17 圆偏振光学成像系统示意图^[55]

Fig. 17 Schematic of circular polarization imaging system^[55]

图 18 所示为实验结果。图中横坐标是样品深度,纵坐标是相对能见度,点划线表示非偏振光入射时的能见度,作为参考值。图中, g 表示各向异性系数,由散射颗粒的直径决定;CO 表示入射光的同向偏振光;CR 表示入射光的正交向偏振光。图 18(a)是圆偏振光入射的结果,圆偏振光经目标反射后其偏振态反转,因此 CR 携带了目标的绝大多数信息,同时由于圆偏振记忆效应,其携带的信息并没有受到散射颗粒的影响,因此,采集的图像相对能见度很大,表明了其去散射能力较强;图 18(b)是线偏振光入射的结果,线偏振光

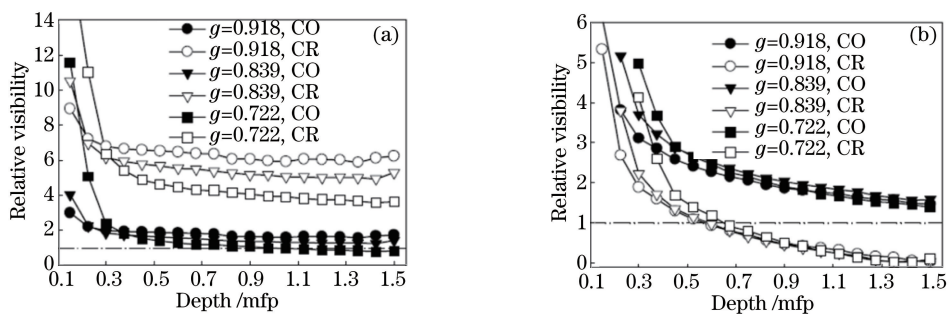


图 18 圆偏振去散射实验结果^[55]

Fig. 18 Experimental results by circular polarization descattering^[55]

经目标反射后仍保持原偏振态,因此 CO 携带了目标的绝大多数信息,而由于线偏振受散射颗粒退偏作用明显,因此随着样品深度增加,其相对能见度下降明显,表明了线偏振光不具备去散射能力。这里需要注意的是,图 18 中横坐标表示为深度,但是该参量并不表示几何尺度,而是归一化相对深度,其与水中散射颗粒的散射系数相关,用 mfp 表示。文献[56]对圆偏振光和线偏振光在散射介质中的后向散射特性进行了详细的分析,理论上证明了该技术的正确性。

4 结束语

主要介绍了偏振光学成像去雾技术的基本原理、实现途径与算法、国内外研究进展和发展现状。可见光在雾霾气象条件下或其他散射介质中都满足米氏散射模型,而米氏散射模型决定了其杂散光都具有部分偏振特性,这也意味着在这些散射介质中,偏振光学成像去雾技术都可以发挥重要的作用,应用范围较广。而且,偏振信息反演退化模型相比图像处理技术更精确,因此,得到的去雾效果更好。另外,算法简单、实时性好也是该技术的优势。

为了更全面地介绍偏振光学成像技术在散射介质中成像的特点和优势,将相关的用于散射介质中清晰成像的偏振光学成像技术统称为偏振光学成像去雾技术,并分为被动偏振光学成像去雾技术和主动偏振光学成像去雾技术。

被动偏振光学成像去雾技术主要基于雾霾气象状况下的大气物理退化模型,从采集到的多幅不同偏振方向的图像中精确估算大气光强和无穷远处大气光强两个关键参数,反演退化过程,获得退化前的场景清晰图像。该类去雾技术又可细分为基于偏振差分的去雾技术和基于斯托克斯矢量的去雾技术。其中,依赖于偏振光学成像探测系统的不断发展^[57-59],基于斯托克斯矢量的实时偏振光学成像去雾技术有望很快实现。主动偏振光学成像去雾技术不考虑大气物理退化模型,根据主动光在散射介质中的偏振传输特性进行清晰成像。该类去雾技术又可细分为偏振差分主动成像去雾技术和圆偏振成像去雾技术。

总之,偏振光学成像去雾技术经过了二十多年的发展,理论上已经较为成熟,实验上得到了良好的去雾效果,环境适应性和算法可靠性也都得到了证明,在今后的发展中,如何将其用于实际应用是一个重要的研究方向,其中包括算法的实时去雾处理、偏振去雾成像系统的开发和集成等关键技术。偏振光学成像去雾技术只考虑了直接透射光的衰减过程而没有考虑其散射过程,这也导致了去雾后的图像普遍存在边缘模糊的问题,因此,研究新的大气物理退化模型也是一个重要的研究方向,进而提高偏振光学成像去雾技术的去雾能力。偏振光学成像去雾技术与其他去雾技术的有机结合将是另一个重要的研究方向,最大程度地恢复图像信息、提高去雾技术的效率、消除雾霾对光学成像的影响才是去雾技术的最终发展目标。

参 考 文 献

- [1] Xu Y, Wen J, Fei L K, *et al.* Review of video and image defogging algorithms and related studies on image restoration and enhancement[J]. *IEEE Access*, 2016, 4: 165-188.
- [2] Guo Fan, Cai Zixing, Xie Bin, *et al.* Review and prospect of image dehazing techniques[J]. *Journal of Computer Applications*, 2010, 30(9): 2417-2421.
郭 璠, 蔡自兴, 谢 斌, 等. 图像去雾技术研究综述与展望[J]. *计算机应用*, 2010, 30(9): 2417-2421.
- [3] Liu J, Wang X, Chen M, *et al.* Thin cloud removal from single satellite images[J]. *Optics Express*, 2014, 22(1): 618-632.
- [4] Rajput G S, Rahman Z. Hazard detection on runways using image processing techniques[C]. *Defense and Security Symposium of SPIE*, 2008: 69570D.
- [5] Russo F. An image enhancement technique combining sharpening and noise reduction [J]. *IEEE Conference on Instrumentation and Measurement*, 2002, 51(4): 824-828.
- [6] He K M, Sun J, Tang X O. Single image haze removal using dark channel prior[J]. *IEEE Conference on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2011, 33(12): 2341-2353.
- [7] Tan R T. Visibility in badweather from a single image [C]. *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2008:1-8.
- [8] Tarel J P, Hautière N. Fast visibility restoration from a single color or gray level image [C]. *IEEE Conference on Computer Vision*, 2009: 2201-2208.

- [9] Fattal R. Single image dehazing[J]. *Acm Transactions on Graphics*, 2008, 27(3): 1-9.
- [10] Kopf J, Neubert B, Chen B, *et al.* Deep photo: Model-based photograph enhancement and viewing [J]. *ACM transactions on graphics (TOG)*, 2008, 27(5): 116.
- [11] Schaul L, Fredembach C, Süssstrunk S. Color image dehazing using the near-infrared [C]. *IEEE International Conference on Image Processing (ICIP)*, 2009: 1629-1632.
- [12] Feng Chen, Zhuo Shaojie, Zhang Xiaopeng, *et al.* Near-infrared guided color image dehazing [C]. *IEEE 20th International Conference on Image Processing*, 2013: 2363-2367.
- [13] Chen Z Y, Wang X, Liang R G. RGB-NIR multispectral camera[J]. *Optics Express*, 2014, 22(5): 4985-4994.
- [14] Schechner Y Y, Narasimhan S G, Nayar S K. Polarization-based vision through haze [J]. *Applied Optics*, 2003, 42(3): 511-525.
- [15] Nayar S K, Narasimhan S G. Vision in bad weather[C]. *IEEE Conference on Computer Vision*, 1999, 2: 820-827.
- [16] Chang P C Y, Flitton J C, Hopcraft K I, *et al.* Improving visibility depth in passive underwater imaging by use of polarization[J]. *Applied Optics*, 2003, 42(15): 2794-2803.
- [17] Schechner Y Y, Narasimhan S G, Nayar S K. Instant dehazing of images using polarization[C]. *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2001, 1: I-I.
- [18] Namer E, Schechner Y Y. Advanced visibility improvement based on polarization filtered images [C]. *International Society for Optics and Photonics*, 2005: 588805.
- [19] Mudge J, Virgen M. Real time polarimetric dehazing[J]. *Applied Optics*, 2013, 52(9): 1932-1938.
- [20] Feng B, Shi Z. PD based determination of polarized reflection regions in bad weather[C]. *IEEE Conference on Image and Signal Processing*, 2009: 1-5.
- [21] Shwartz S, Namer E, Schechner Y Y. Blind haze separation[C]. *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2006, 2: 1984-1991.
- [22] Kaftory R, Schechner Y Y, Zeevi Y Y. Variational distance — dependent image restoration [C]. *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2007: 1-8.
- [23] Namer E, Shwartz S, Schechner Y Y. Skyless polarimetric calibration and visibility enhancement[J]. *Optics Express*, 2009, 17(2): 472-493.
- [24] Fang S, Xia X S, Huo X, *et al.* Image dehazing using polarization effects of objects and airlight[J]. *Optics Express*, 2014, 22(16): 19523-19537.
- [25] Huang B J, Liu T G, Hu H F, *et al.* Underwater image recovery considering polarization effects of objects[J]. *Optics Express*, 2016, 24(9): 9826-9838.
- [26] Liu F, Cao L, Shao X P, *et al.* Polarimetric dehazing utilizing spatial frequency segregation of images[J]. *Applied Optics*, 2015, 54(27): 8116-8122.
- [27] Cao L, Shao X P, Liu F, *et al.* Dehazing method through polarimetric imaging and multi-scale analysis [C]. *SPIE Sensing Technology Applications*, 2015, 9501: 950111.
- [28] Wang Yong, Xue Mogen, Huang Qinchao. Polarization dehazing algorithm based on atmosphere background suppression[J]. *Computer Engineering*, 2009, 35(4): 271-272.
王 勇, 薛模根, 黄勤超. 基于大气背景抑制的偏振去雾算法[J]. *计算机工程*, 2009, 35(4): 271-272.
- [29] Peng Wenzhu. Polarization dehazing algorithm based on atmosphere scattering model [J]. *Electronic Measurement Technology*, 2011, 34(7): 43-45.
彭文竹. 基于大气散射模型的偏振图像去雾算法[J]. *电子测量技术*, 2011, 34(7): 43-45.
- [30] Zhang Xiaoling, Xu Yan, Wang Xiaozhong, *et al.* Research on image fusion based on polarization of haze[J]. *Journal of Xiamen University (Natural Science)*, 2011, 50(3): 520-524.
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.
- [31] Schechner Y Y, Karpel N. Clear underwater vision[C]. *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2004, 1: I-I.
- [32] Schechner Y Y, Karpel N. Recovery of underwater visibility and structure by polarization analysis[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2005, 30(3): 570-587.
- [33] Goldstein D H. *Polarized light*[M]. Boca Raton: Taylor and Francis, 2010.
- [34] Solomon J E. Polarization imaging[J]. *Applied Optics*, 1981, 20(9): 1537-1544.
- [35] Zhang W J, Cao Y, Zhang X Z, *et al.* Sky light polarization detection with linear polarizer triplet in light field camera inspired by insect vision[J]. *Applied Optics*, 2015, 54(30): 8962-8970.

- [36] Liang J, Ren L Y, Ju H J, *et al.* Visibility enhancement of hazy images based on a universal polarimetric imaging method[J]. *Journal of Applied Physics*, 2014, 116(17): 173107.
- [37] Liang J, Ren L Y, Qu E S, *et al.* Method for enhancing visibility of hazy images based on polarimetric imaging[J]. *Photonics Research*, 2014, 2(1): 38-44.
- [38] Zhang W F, Liang J, Ju H J, *et al.* A robust haze-removal scheme in polarimetric dehazing imaging based on automatic identification of sky region[J]. *Optics & Laser Technology*, 2016, 86: 145-151.
- [39] Liang J, Ren L Y, Ju H J, *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.
- [40] Zhao Changxia, Duan Jin, Wang Xinxin, *et al.* Experimental comparison of polarization image restoration of three random angles and two orthogonal angles[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, 52(10): 101005.
赵长霞, 段锦, 王欣欣, 等. 3个任意角度与2个正交角度偏振图像复原实验比较[J]. *激光与光电子学进展*, 2015, 52(10): 101005.
- [41] Liang J, Zhang W F, Ren L Y, *et al.* Polarimetric dehazing method for visibility improvement based on visible and infrared image fusion[J]. *Applied Optics*, 2016, 55(29): 8221-8226.
- [42] Andreou A G, Kalayjian Z K. Polarization imaging: Principles and integrated polarimeters[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2002, 2(6): 566-576.
- [43] Shen J, Wang H B, Chen Z, *et al.* Polarization calculation and underwater target detection inspired by biological visual imaging[J]. *Sensors & Transducers*, 2014, 169(4): 33-41.
- [44] Rowe M P, Tyo J S, Engheta N, *et al.* Polarization-difference imaging: A biologically inspired technique for observation through scattering media[J]. *Optics Letters*, 1995, 20(6): 608-610.
- [45] Pugh E N, Engheta N. Colorimetric representations for use with polarization-difference imaging of objects in scattering media[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1998, 15(2): 367-374.
- [46] Yemelyanov K M, Lin S S, Pugh J E N, *et al.* Adaptive algorithms for two-channel polarization sensing under various polarization statistics with nonuniform distributions[J]. *Applied Optics*, 2006, 45(22): 5504-5520.
- [47] Brousseau D, Plant J, Thibault S. Real-time polarization difference imaging (rPDI) reveals surface details and textures in harsh environments[C]. *SPIE*, 2013, 8720: 87200E.
- [48] Fade J, Panigrahi S, Carré A, *et al.* Long-range polarimetric imaging through fog[J]. *Applied Optics*, 2014, 53(18): 3854-3865.
- [49] Treibitz T, Schechner Y Y. Active polarization descattering[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2009, 31(3): 385-399.
- [50] Savage L. Underwater imaging gets clearer[J]. *Optics and Photonics News*, 2013, 24(7): 30-37.
- [51] Zhan Juntong, Fu Qiang, Zhang Su, *et al.* Research on the Effects of Forward Scattering Angle to Polarization Imaging Contrast[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(7): 0711007.
战俊彤, 付强, 张肃, 等. 前向散射角度对偏振成像对比度影响的研究[J]. *光学学报*, 2015, 35(7): 0711007.
- [52] Han Jiefei, Xia Min, Sun Liying, *et al.* Influence of underwater targets with different polarization properties on the resolution of imaging system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(3): 0311001.
韩捷飞, 夏珉, 孙立颖, 等. 水下目标不同偏振特性对成像系统分辨率的影响[J]. *光学学报*, 2016, 36(3): 0311001.
- [53] MacKintosh F C, Zhu J X, Pine D J, *et al.* Polarization memory of multiply scattered light[J]. *Physical Review B*, 1989, 40(13): 9342.
- [54] Kim A D, Moscoso M. Backscattering of circularly polarized pulses[J]. *Optics Letters*, 2002, 27(18): 1589-1591.
- [55] Nothdurft R, Yao G. Applying the polarization memory effect in polarization-gated subsurface imaging[J]. *Optics Express*, 2006, 14(11): 4656-4661.
- [56] Ni X H, Alfano R R. Time-resolved backscattering of circularly and linearly polarized light in a turbid medium[J]. *Optics Letters*, 2004, 29(23): 2773-2775.
- [57] Tyo J S, Goldstein D L, Chenault D B, *et al.* Review of passive imaging polarimetry for remote sensing applications[J]. *Applied Optics*, 2006, 45(22): 5453-5469.
- [58] Trippe S. Polarization and polarimetry: A review[J]. *Journal of the Korean Astronomical Society*, 2014, 47(1): 15-39.
- [59] Liu Jing, Xia Runqiu, Jin Weiqi, *et al.* Review of imaging polarimetry based on Stokes vector[J]. *Optical Technique*, 2013, 39(1): 56-62.
刘敬, 夏润秋, 金伟其, 等. 基于斯托克斯矢量的偏振成像仪器及其进展[J]. *光学技术*, 2013, 39(1): 56-62.