

基于插值处理的散射介质中偏振成像实验研究^{*}

管今哥¹ 马 森²

(1. 中北大学省部共建动态测试技术国家重点实验室 太原 030051; 2. 太原工业学院 太原 030008)

摘 要:针对散射介质中光学成像质量受散射效应干扰的问题,基于 Jaffe 成像模型,实验研究了基于插值处理的偏振成像降噪方法,实现目标信号与后向散射噪声的有效分离。首先,利用退偏振特性建立信息插值处理与信号提取模型;其次,搭建偏振成像实验光路结构进行验证,以脂肪乳溶液模拟散射环境,在偏振激光照明条件下获取散射场景的相互正交的偏振探测通道图像;最后,对所获取偏振图像进行插值处理并利用信噪比参数评价其可靠性。实验结果表明,当脂肪乳溶液浓度依次为 0.1%、0.2%、0.3% 与 0.4% 时,基于插值处理的偏振成像方法所对应图像的信噪比依次为 112.5、9.165、13.82 与 11.88,能够有效地抑制后向散射噪声对光学成像过程的影响。

关键词:偏振成像;插值;散射;信噪比

中图分类号: TN249 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 140.3060

Experimental investigation on polarization imaging in scattering media based on interpolation

Guan Jingge¹ Ma Miao²

(1. State Key Laboratory of Dynamic Measurement Technology, North University of China, Taiyuan 030051, China;
2. Taiyuan Institute of Technology, Taiyuan 030008, China)

Abstract: To address the problem of optical imaging quality being affected by scattering effect in scattering media, this paper conducts experimental investigation on interpolation processing based polarization imaging denoising method, the purpose of which is to effectively separate the target signal from backscatter noise with the aid of Jaffe imaging model. Firstly, an information interpolation processing and signal extraction model is established based on depolarization property. Secondly, optical path structure of polarization imaging experiment is built for verification. Fat emulsion solution is used to simulate the scattering environment, and orthogonal polarization detection channel images of the scattering scene is obtained under polarized laser illumination conditions. Finally, the obtained polarization images are processed by interpolation and the parameter of signal to noise ratio is used to evaluate the reliability. The experimental results show that the signal to noise ratio values of interpolation processing based polarization imaging method are 112.5, 9.165, 13.82, and 11.88, subsequently, which corresponds to concentrations of fat emulsion solutions of 0.1%, 0.2%, 0.3%, and 0.4%, subsequently. The investigation in this paper can suppress the impact of backscatter noise on the optical imaging process.

Keywords: polarization imaging; interpolation; scattering; signal to noise ratio

0 引 言

水下、生物组织、雾霾等散射环境中目标探测与识别在军用与民用领域均具有重要应用价值。当利用光学成像方法对散射介质中目标进行探测与识别时,成像过程受

散射效应的干扰,图像质量很难达到令人满意的效果^[1-3]。若增强光学成像效果,则散射噪声必须被抑制。为解决散射噪声所引起的图像质量下降问题,国内外研究人员开展了基于物理参量(时间^[4-5]、相位^[6]、光谱^[7-8]、偏振^[9]等)与图像处理^[10-11]的两类方法对目标信号与散射噪声进行分

收稿日期:2023-11-03

^{*} 基金项目:山西省应用基础研究计划(20210302124702)、国家自然科学基金青年项目(62305237)资助

离,以提升图像信噪比。

本文重点关注基于物理方法的散射噪声偏振降噪研究,其因成本低、操作简单而受到广泛关注。卫毅等^[12]研究了浅海被动水下偏振成像技术,实现了无色彩畸变的图像探测效果。光在散射环境中传输时能量衰减严重,考虑到激光具有能量密度高的特点,以激光照明为基础的目标主动偏振成像比自然光照明具有更远的探测距离。偏振是光的属性之一,其包括偏振角与偏振度等参量。散射介质中偏振探测的原理是基于目标信号与散射噪声的偏振特性差异,因而其主要分为偏振度与偏振角成像两类方法。对于偏振度成像,主要利用目标信号与散射噪声的退偏振差异来区分二者。Deng等^[13]建立了基于偏振信息的散射环境中目标信号提取模型,由于目标偏振度、散射噪声偏振度与待复原目标信号3个参量耦和于同一公式,需要事先对目标与散射噪声的偏振度信息进行估计,因而其难以适用于多目标场景。为克服多次偏振滤波带来的图像灰度非均匀连续分布问题, Li等^[14]采用单偏振滤波的方式对散射环境中目标信号进行了增强。Hu等^[15]使用圆偏振信息对浑浊介质条件下的降质图像复原进行了优化,由于圆偏振光与线偏振光的传输特性差异与介质的光学参数密切相关,因而需要确定适用于圆偏振信息的散射介质条件。刘飞等^[16]进一步考虑了非均匀光场制约下的偏振成像情况,能够有效地提升图像对比度与复原细节信息。许珈诺等^[17]抛开空域的角度,从频域方面实现更高浑浊情形下的目标偏振探测。褚金奎等^[18]使用特定偏振态信息对水下图像进行了去散射,能够有效地抑制浑浊水体的散射效应。考虑到目前偏振去噪方法需要事先从非目标区域对后向散射噪声的偏振度参量进行估计, Guan等^[19]在无背景参照情形下对散射图像进行了偏振复原。桂心远等^[20]基于神经网络对散射环境中偏振成像效果进行了增强。赵鹏翔等^[21]利用Stokes矢量对水下偏振复原结果进行了质量提升。对于偏振角成像,主要利用目标信号与散射噪声的偏振方向差异来区分二者。Ren等^[22]对浑浊介质中目标进行了偏振差分探测原理的研究,并通过理论与实验相结合的方式对其可靠性进行了验证,然而该方法仅适用于偏振的物体探测,非偏振目标信号因其模抑制而淹没于散射噪声中。Tian等^[23]提出快速偏振差分成像方法,基于Stokes-Mueller形式对偏振信息进行实时处理,提高了目标探测效率。朱京平等^[24]对浑浊介质中偏振差分成像技术进行了总结与展望,为该技术的后续研究提供了指引。

综上所述,以偏振度为载体的散射介质中光学成像研究更加广泛,这是由于目标信号与散射噪声的退偏振特性差异比较明显。已有的基于偏振度信息的图像复原方法存在计算繁琐的问题,插值处理方法在获取相互正交的偏振探测通道图像基础上,在理论上仅依赖图像之间的线性计算便能够有效地抑制后向散射噪声对光学成像质量的

干扰,简化了计算过程^[25]。本文对基于插值处理的散射介质中偏振成像方法进行详细实验研究,系统地研究不同散射条件下图像信噪比对插值因子的依赖特性,验证其在抑制散射噪声方面的可靠性,为提高散射介质中目标探测效率提供参考。

1 偏振插值成像的散射噪声分析

基于插值处理的散射介质中光学偏振成像过程如下。在偏振激光照明条件下,光学成像系统借助检偏器获取散射场景的相互正交的偏振探测通道图像。偏振信息插值处理的数学形式为:

$$I_{pi}(x, y) = I_{cross}(x, y) - \alpha I_{co}(x, y) \quad (1)$$

式中: I_{pi} 为插值处理图像; I_{cross} 与 I_{co} 分别为正交偏振与平行偏振探测通道内的图像信息; α 为偏振插值因子; (x, y) 表示图像的空间位置坐标。

基于插值处理的偏振成像是以激光为照明光源的主动探测方法,其受散射效应的干扰通常由 Jaffe 光学成像模型进行描述。在该模型中,光学成像系统获取的图像成分由目标信号、前向散射光噪声以及后向散射光噪声组成。其中,前向散射过程改变目标信号光线的传输方向,降低图像分辨率;而后向散射光直接来自介质,不包含目标信息并降低图像对比度。本文对 Jaffe 成像模型进行简化,忽略前向散射效应对成像质量的影响^[26]:

$$I(x, y) = I_T(x, y) + I_B(x, y) \quad (2)$$

式中: $I(x, y)$ 为探测器接收到的图像; $I_T(x, y)$ 为目标信号成分; $I_B(x, y)$ 为后向散射噪声。

根据偏振光学理论可知,光波的正交偏振分量相互独立。在式(1)与(2)基础上,偏振插值处理图像可表示为:

$$I_{pi}(x, y) = I_{pi}^T(x, y) + I_{pi}^B(x, y) \quad (3)$$

式中: $I_{pi}^T(x, y)$ 与 $I_{pi}^B(x, y)$ 分别为目标信号与后向散射噪声相关的偏振插值处理图像,表达形式如下:

$$I_{pi}^T(x, y) = I_{cross}^T(x, y) - \alpha I_{co}^T(x, y) \quad (4)$$

$$I_{pi}^B(x, y) = I_{cross}^B(x, y) - \alpha I_{co}^B(x, y) \quad (5)$$

式中:角标 $cross$ 与 co 分别为正交偏振与平行偏振探测分量。

由式(5)可知, $I_{pi}^B(x, y)$ 是叠加于目标偏振插值处理图像中的噪声。在基于插值处理的偏振成像过程中,本文采用 $I_{pi}^T(x, y)$ 与 $I_{pi}^B(x, y)$ 的比值 R 对其如何抑制后向散射噪声的原理进行说明:

$$R = \begin{cases} \frac{I_{co}^B}{I_{co}^T}, & r_B = r_T \\ \frac{I_{co}^B}{I_{co}^T} \cdot \frac{(r_B - \alpha)}{(r_T - \alpha)}, & r_B \neq r_T \end{cases} \quad (6)$$

r_B 与 r_T 的表达形式如下:

$$r_B = \frac{I_{cross}^B(x, y)}{I_{co}^B(x, y)} \quad (7)$$

$$r_T = \frac{I_{cross}^T(x, y)}{I_{co}^T(x, y)} \quad (8)$$

由式(6)可知,当 r_B 与 r_T 数值相等时,偏振插值处理图像的信噪比与插值因子 α 无关。在该情形下,插值处理方法无法抑制后向散射光对成像过程的影响,这是由于目标信号与后向散射噪声具有相同的退偏振特性,利用该差异无法区分二者。当 r_B 与 r_T 数值不相等时,偏振插值处理图像的质量与插值因子 α 的数值密切相关,并且在 $\alpha = r_B$ 情形下,后向散射噪声能够在理论上被完全滤除,此时图像质量最佳。对于散射介质中目标偏振成像, r_B 与后向散射光的退偏振特性密切相关,但其数值无法事先得知,因而需要通过插值处理的方法确定 α 。通过式(1)、(4)与(5)并结合退偏振理论可知, α 的取值范围为 $[0, 1]$ 。

2 偏振成像实验设计

本文在后向散射方向进行散射介质中偏振成像实验,光源与探测器位于同侧,相应的成像光路结构如图1所示。采用工作波长632.8 nm的He-Ne激光器作为照明光源。目标由粘贴于光盘上的铝片混合组成,尺寸分别为9 mm×14 mm与1 mm×14 mm。其中,光盘与铝片表面分别呈现光滑与粗糙特征,且二者的反射率相近。10%脂肪乳溶液被用来模拟散射环境,其盛放于50 mm×50 mm×50 mm的石英比色皿容器中,通过改变脂肪乳浓度对散射程度进行控制。沿着照明方向,目标表面与容器前壁之间的距离为27 mm。起偏器与检偏器能够保证所需的照明偏振与探测偏振。8 bit CCD相机用来记录散射环境中的目标图像信息,其前端的光圈以及成像光路中的衰减器能够有效地避免激光较高亮度造成的图像饱和。

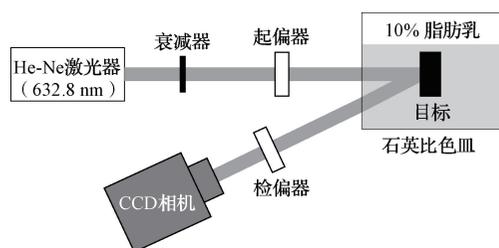


图1 散射介质中激光偏振成像实验装置

Fig. 1 Experimental setup for laser polarization imaging in scattering medium

3 实验结果分析

3.1 目标信号与后向散射噪声分离

为验证基于插值处理的偏振成像方法抑制后向散射光的有效性,需要对目标信号与后向散射噪声进行区分。受Tanzid等^[27]研究工作的启发,本文采用吸收的方法对二者进行分离,原因如下。在散射介质中,目标信号光所经历的传输轨迹要长于后向散射光,因而当在介质中加入吸收体时,前者相比于后者会被优先吸收。本文以印度墨水作为吸收体,若加入介质中的吸收体数量适当,则探测图像中仅保留后向散射噪声成分。基于Jaffe光学成像模

型可知,通过计算有无吸收体所对应图像的差异即可获得目标信号。不同浓度脂肪乳溶液下目标信号与后向散射噪声的分离结果如图2所示。

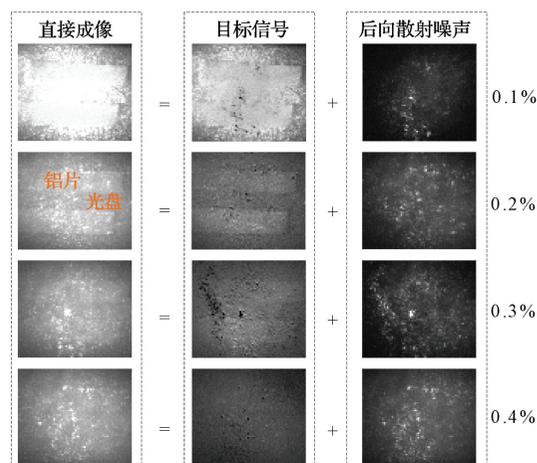


图2 不同脂肪乳浓度下的目标信号与散射噪声特性
Fig. 2 Properties of target signal and scatter noise at different intralipid concentrations

对于直接成像过程,当脂肪乳溶液浓度由0.1%增加到0.4%时,成像质量逐渐降低,这是由于不断增加的后向散射光成分导致。基于吸收的方法能够将目标信号独立提取,随着散射程度的增加,信号衰减程度增加。同时,目标中铝片与光盘反射率接近,二者之间的差异不明显。后向散射噪声直接来源于散射介质,不包含目标信息。以上目标信号与后向散射噪声的分离结果与式(2)Jaffe模型中图像成分组成相吻合。

3.2 目标信号与后向散射噪声偏振特性

在偏振照明条件下,目标信号与后向散射噪声在相互正交偏振探测通道内的分布特性如图3所示。每个成分均包含随机20个区域,每个区域由9个像素组成,区域所对应数值由像素强度平均值计算得到。图像中每一坐标点与原点连线所对应的斜率恰好是式(9)与(10)中的正交偏振探测分量比值。在不同脂肪乳溶液浓度下,目标信号或后向散射噪声的斜率分布位于某一范围,本文取最大值与最小值的平均作为斜率标称值,并进行标注。对于后向散射噪声,其在0.1%、0.2%、0.3%与0.4%脂肪乳溶液浓度下的斜率数值依次为0.129 0、0.113 1、0.105 0与0.111 7。说明不同散射程度下,入射偏振光的退偏振行为存在差异,因而偏振探测过程中由平行偏振分量向正交偏振分量转化的比例不同。同时,上述数值对脂肪乳溶液浓度的变化不明显,原因在于后向散射光具有较强的保偏特性。对于目标中的铝片部分,其斜率数值依次为0.113 4、0.152 3、0.167 2与0.267 4;而光盘所对应的斜率数值依次为0.540 6、0.414 3、0.283 0与0.307 3。铝片对应的斜率数值明显小于光盘,这是由于后者表面比前者更加粗糙,导致光与光盘作用过程中漫散射程度增加,从

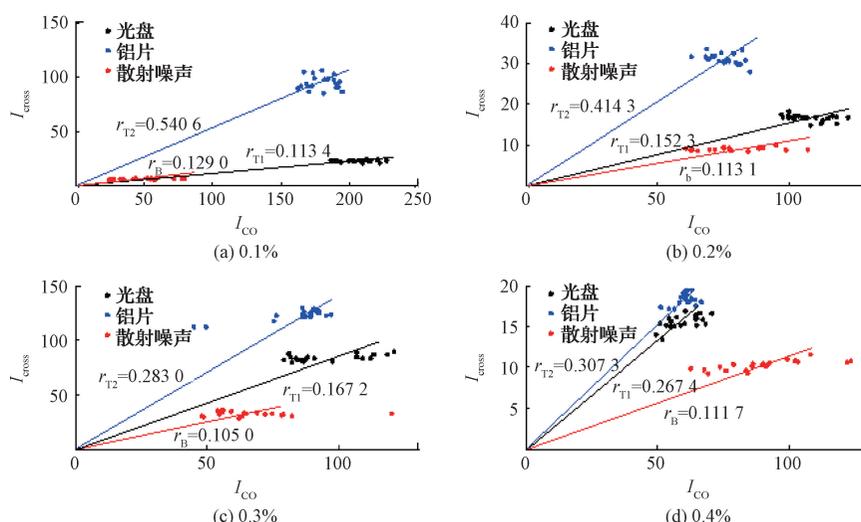


图3 目标信号与后向散射噪声的偏振特性
Fig. 3 Polarization property of target signal and scatter noise

而破坏入射光偏振态。通过对入射偏振的较强退偏振作用,正交偏振探测通道内的光能量分布比例增加。根据图3中直线斜率分布特性可知,目标信号与后向散射噪声的退偏振特性存在差异,因而能够通过基于插值处理的偏振成像方法对散射介质中目标进行探测。由图3可以看出,对于传统的正交偏振成像,后向散射噪声无法被完全滤除,这是由于偏振照明条件下的后向散射散射光并非完全保偏,其叠加于目标信号并降低图像质量。

3.3 偏振插值成像结果分析

首先在0.2%脂肪乳溶液浓度下进行了基于插值处理的偏振成像,并与其他成像方法的效果进行了对比,如图4所示,其中 I_{TPS} 为参考图像, I_{PS} 为偏振插值图像。对于直接成像方法,图像质量因后向散射噪声的干扰而降低。对于偏振插值处理成像,由图3可知,图像所对应的插值因子为0.1131,此时后向散射噪声被有效滤除。参考图像获取过程为首先通过图2的吸收方法得到目标偏振信息,再进一步完成插值处理,以此评价基于插值处理的偏振成像效能。选取虚线位置所对应的像素强度分布对最优插值偏振图像与参考图像的差异进行比较,两者在不同空间位置处的差异较小。以上结果说明基于插值处理的偏振成像方法能够抑制后向散射噪声对成像质量的影响。

在0.2%脂肪乳溶液浓度下,插值因子对图像质量的影响特性如图5(a)所示。插值因子 α 的变化范围为0.1131~0.9000,图像质量对其数值比较敏感。当插值因子由0.4000增加到0.9000时,后向散射噪声干扰成像过程比较明显,图像质量降低程度与插值因子的数值密切相关。进一步以数值曲线形式研究了不同插值因子下参考图像与偏振插值图像的差异,如图5(b)所示。当插值因子的数值远离0.1131时,参考图像与偏振插值图像

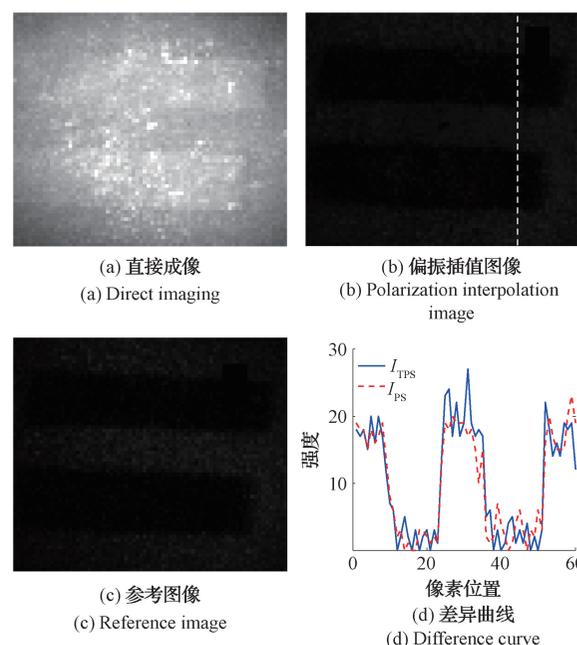


图4 基于插值处理的偏振成像效果验证
Fig. 4 Effectiveness verification of polarization interpolation imaging

的差异程度逐渐增加,此时偏振插值成像过程中目标信号被逐渐抑制。

为系统地研究散射介质中基于插值处理的偏振成像效果,定量研究了不同脂肪乳溶液浓度下信噪比对插值因子的依赖特性,如图6所示。其中,信噪比的定义方法为目标信号与后向散射噪声的比值,插值因子的取值范围为0.05到0.90,步进间隔为0.05。当脂肪乳溶液浓度由0.1%变为0.4%时,最优插值因子依次为0.1558、0.1387、0.1016和0.1272,所对应的图像信噪比依次为

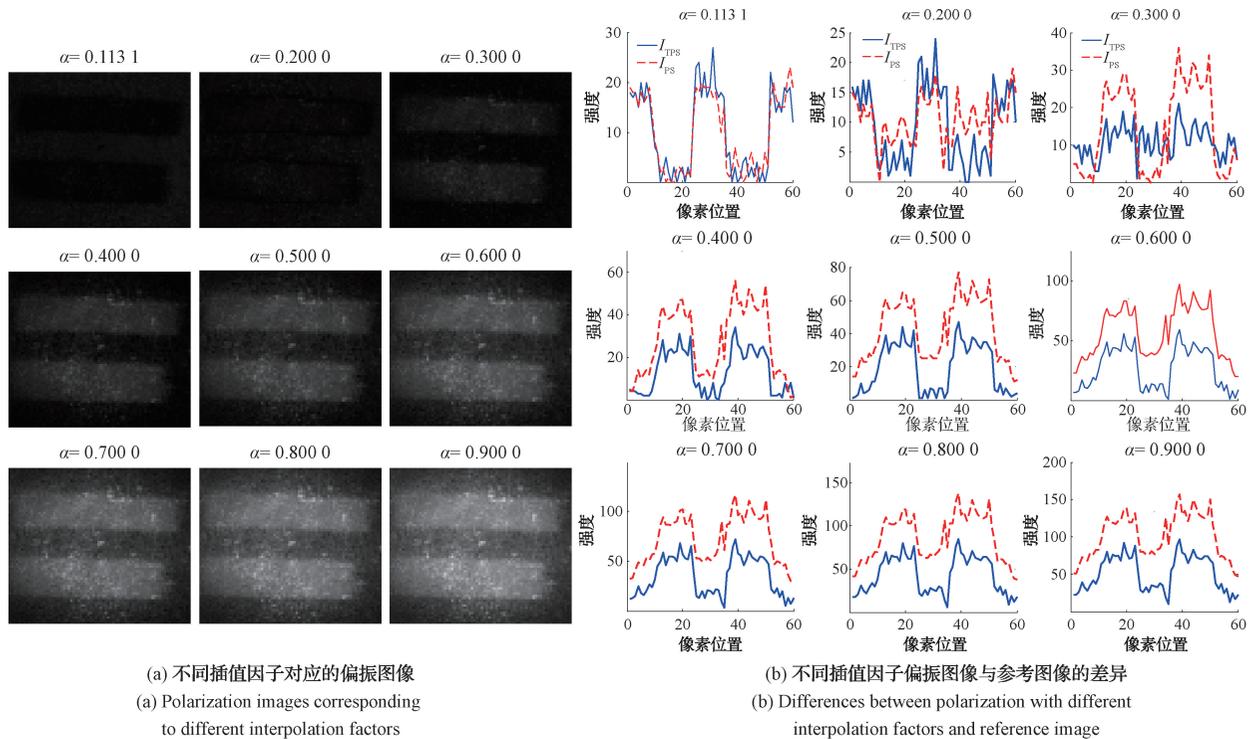


图5 插值因子选取对偏振图像质量的影响特性

Fig. 5 The influence of interpolation factor on polarization image quality

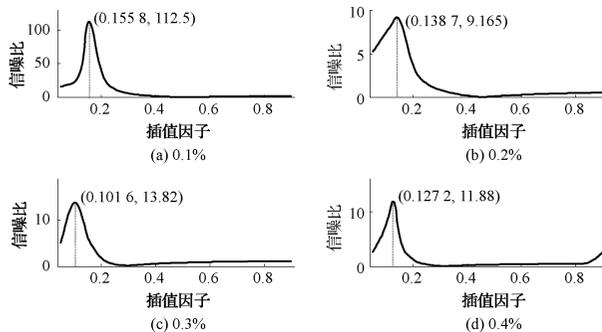


图6 图像信噪比对插值因子的依赖特性

Fig. 6 Dependence of image signal to noise ratio on interpolation factor

112.5、9.165、13.82 和 11.88。同时,不同脂肪乳溶液浓度下最优插值因子对应信噪比的半峰全宽范围依次为 [0.134 7, 0.184 4]、[0.05, 0.190 6]、[0.057 8, 0.145 6] 和 [0.089 7, 0.147 7],表明基于插值处理的偏振成像方法在实际应用过程中,插值因子在偏离最优数值的某一范围内,仍具有较强的后向散射噪声抑制能力。

在不同脂肪乳溶液浓度下,进一步对正交偏振成像与基于插值处理的偏振成像效果进行对比,如图7所示。为增加对图像的直接观察效果,对所获取图像的像素强度值进行了增强。当脂肪乳溶液浓度由0.1%增加到0.4%时,正交偏振图像的质量逐渐降低,尤其在0.4%脂肪乳

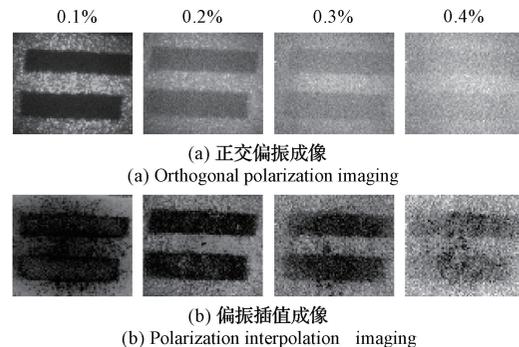


图7 不同偏振成像效果对比

Fig. 7 Comparison of different polarization imaging effects

浓度条件下,目标信号几乎湮没于散射噪声中。这是由于增加的散射程度增强了目标信号的衰减程度,且部分后向散射噪声叠加于图像中。偏振插值图像的质量优于正交偏振成像,在0.4%脂肪乳浓度高浑浊条件下,仍能明显地观察到目标,这是由于后向散射噪声被进一步抑制。通过对比上述偏振成像方法可知,基于插值处理的偏振成像能够有效地对散射介质中目标光学图像进行降噪。这是由于偏振光与脂肪乳介质相互作用过程中,后向散射光的保偏能力有限,仅依靠正交偏振滤波无法完全抑制散射噪声。而偏振插值成像方法则进一步借助相互正交偏振探测分量之间的比例关系,在目标信号与散射噪声退偏特性差异的基础上,抑制散射效应对成像质量的影响。需要

指出的是,0.1%脂肪乳溶液浓度对应的偏振插值处理图像质量欠佳,这是由于相互正交的偏振信息处理过程中,与照明偏振平行的探测通道内较大光强造成图像部分区域饱和。

4 结 论

本文针对散射介质中光学成像质量受散射效应影响的问题,进行了基于插值处理的偏振成像与降噪实验研究。通过目标信号与后向散射噪声的退偏振差异特性,对相互正交的偏振探测通道图像进行插值处理,并分析图像质量对插值因子的依赖特性。实验结果表明在不同散射程度下,偏振插值处理图像的信噪比优于正交偏振图像,其能够更加有效地抑制后向散射噪声。本文下一步研究工作将集中于自动确定最优插值因子来提高目标探测效率。

参 考 文 献

- [1] 陈哲,周旭,沈洁,等. 基于梯度先验的水下图像复原[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(8): 39-46.
CHEN ZH, ZHOU X, SHEN J, et al. Underwater image restoration based on gradient prior [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(8): 39-46.
- [2] 刘致远,但志平. 基于注意力增强的 CycleGAN 图像去雾[J]. 国外电子测量技术, 2023, 42(9): 162-168.
LIU ZH Y, DAN ZH P. Attention-enhanced CycleGAN for image dehazing [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2023, 42(9): 162-168.
- [3] LIANG G B, HORMEL T T, WEI X, et al. Single-shot OCT and OCT angiography for slab-specific detection of diabetic retinopathy [J]. Biomedical Optics Express, 2023, 14(11): 5682-5695.
- [4] CORDEN C, MATOUSEK P, CONTI C, et al. Sub-surface molecular analysis and imaging in turbid media using time-gated Raman spectral multiplexing [J]. Applied Spectroscopy, 2021, 75(2): 156-167.
- [5] REN Y, JIAN J, TAN W, et al. Temporal visualization of femtosecond laser pulses with single-edge transport in turbid media via Monte Carlo simulation [J]. Optics Letters, 2021, 46(10): 2284-2287.
- [6] 刘金鹏,冯怡,刘蕾,等. 全息技术在散射成像领域中的研究及应用进展[J]. 红外与激光工程, 2022, 51(8): 20220307.
LIU J P, FENG Y, LIU L, et al. Research and application progress of holography technology in scattering imaging [J]. Infrared and Laser Engineering, 2022, 51(8): 20220307.
- [7] 薛庆生,白皓轩,李辉,等. 水下高光谱成像探测技术研究进展[J]. 光子学报, 2021, 50(12): 1201001.
XUE Q SH, BAI H X, LI H, et al. Development of underwater hyperspectral imaging detecting technology [J]. Acta Photonica Sinica, 2021, 50(12): 1201001.
- [8] 孙杰,王红萍,张丹,等. 不同颜色照明下的水下成像差异研究 [J]. 水下无人系统学报, 2023, 31(4): 648-653.
SUN J, WANG H P, ZHANG D, et al. Difference between underwater imaging with illumination sources with different colors [J]. Journal of Unmanned Undersea Systems, 2023, 31(4): 648-653.
- [9] 陈雄锋,阮驰. 多参数最优重构水下偏振成像复原方法 [J]. 兵工学报, 2023, 44(7): 2122-2131.
CHEN X F, RUAN CH. Underwater polarization image restoration method using optimal multi-parameters reconstruction [J]. Acta Armamentarii, 2023, 44(7): 2122-2131.
- [10] 王子昭,景明利,史金钢,等. 一种改进 CBAM 机制和细节恢复的单幅图像去雾算法 [J]. 电子测量技术, 2023, 46(2): 161-168.
WANG Z ZH, JING M K, SHI J G, et al. A single image defogging algorithm based on improved CBAM mechanism and detail recovery [J]. Electronic Measurement Technology, 2023, 46(2): 161-168.
- [11] 丁洁,陆安江,彭熙舜,等. 基于颜色校正和加权融合的水下图像增强 [J]. 国外电子测量技术, 2023, 42(3): 167-174.
DING J, LU AN J, PENG X SH, et al. Underwater image enhancement based on color correction and weighted fusion [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2023, 42(3): 167-174.
- [12] 卫毅,刘飞,杨奎,等. 浅海被动水下偏振成像探测方法 [J]. 物理学报, 2018, 67(18): 184202.
WEI Y, LIU F, YANG K, et al. Passive underwater polarization imaging detection method in neritic area [J]. Acta Physica Sinica, 2018, 67(18): 184202.
- [13] DENG J, ZHU J, LI H, et al. Real-time underwater polarization imaging without relying on background [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2023, 169: 107721.
- [14] LI H, ZHU J, DENG J, et al. Underwater active polarization descattering based on a single polarized image [J]. Optics Express, 2023, 31(13): 21988-22000.
- [15] HU H, ZHAO L, LI X, et al. Polarimetric image recovery in turbid media employing circularly polarized light [J]. Optics Express, 2018, 26(19): 25047-25059.
- [16] 刘飞,孙少杰,韩平丽,等. 基于稀疏低秩特性的水下非均匀光场偏振成像技术研究 [J]. 物理学报,

- 2021, 70(16): 164201.
- LIU F, SUN SH J, HAN P L, et al. Clear underwater vision in non-uniform scattering field by low-rank-and-sparse-decomposition-based polarization imaging [J]. *Acta Physica Sinica*, 2021, 70 (16): 164201.
- [17] 许珈诺, 赵健, 李校博, 等. 基于频谱信息的浑浊水下偏振成像技术 [J]. *光学学报*, 2023, 43(18): 1811001.
- XU J N, XU J, LI X B, et al. Polarization imaging in turbid water based on spectral information [J]. *Acta Optica Sinica*, 2023, 43(18): 1811001.
- [18] 褚金奎, 张培奇, 成昊远, 等. 基于特定偏振态成像的水下图像去散射方法 [J]. *光学精密工程*, 2021, 29(5): 1207-1215.
- CHU J K, ZHANG P Q, CHENG H Y, et al. De-scattering method of underwater image based on imaging of specific polarization state [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2021, 29(5): 1207-1215.
- [19] GUAN J, ZHAO Y, ZHENG Y, et al. Optical polarization imaging for underwater target detection with non-scatter background [J]. *Journal of Measurement Science and Instrumentation*, 2020, 11(4): 335-342.
- [20] 桂心远, 张然, 成昊远, 等. 基于神经网络和偏振成像的多浑浊度水下图像复原 [J]. *激光与光电子学进展*, 2022, 59(4): 0410001.
- GUI X Y, ZHANG R, CHENG H Y, et al. Multi-turbidity underwater image restoration based on neural network and polarization imaging [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2022, 59(4): 0410001.
- [21] 赵鹏翔, 刘宾, 潘晋孝. 基于 Stokes 矢量的多视角水下偏振成像算法研究 [J]. *国外电子测量技术*, 2021, 40(3): 77-82.
- ZHAO P X, LIU B, PAN J X. Research on multi-angle underwater polarization imaging algorithm based on Stokes vector [J]. *Foreign Electronic Measurement Technology*, 2021, 40(3): 77-82.
- [22] REN W, GUAN J. Investigation on principle of polarization-difference imaging in turbid conditions [J]. *Optics Communications*, 2018, 413: 30-38.
- [23] TIAN H, ZHU J, TAN S, et al. Rapid underwater target enhancement method based on polarimetric imaging [J]. *Optics and Laser Technology*, 2018, 108: 515-520.
- [24] 朱京平, 邓金鑫, 李浩翔, 等. 浑浊介质中偏振差分成像技术发展及展望 [J]. *光电技术应用*, 2022, 37(5): 1-9.
- ZHU J P, DENG J X, LI H, et al. Development and prospects of polarization differential imaging in turbid media [J]. *Electro-optic Technology Application*, 2022, 37(5): 1-9.
- [25] WALKER J G, CHANG P C Y, HOPCRAFT K I. Visibility depth improvement in active polarization imaging in scattering media [J]. *Applied Optics*, 2000, 39(27): 4933-4941.
- [26] 林森, 周天飞, 查子月. 基于通道量化与红色先验融合的水下光学图像清晰化 [J]. *电子测量与仪器学报*, 2023, 37(2): 110-120.
- LIN S, ZHOU T F, ZHA Z Y. Underwater optical image sharpening based on fusion of channel quantization and red prior [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2023, 37(2): 110-120.
- [27] TANZID M, HOGAN N J, SOBHANI A, et al. Absorption-induced image resolution enhancement in scattering media [J]. *ACS Photonics*, 2016, 3(10): 1787-1793.

作者简介

管今哥(通信作者), 博士, 副教授, 主要研究方向为目标偏振探测与识别、偏振成像仪器研制。

E-mail: jgguan@nuc.edu.cn

马淼, 博士, 副教授, 主要研究方向为光学图像处理。

E-mail: mam@tit.edu.cn