

· 综 述 ·

浑浊介质中偏振差分成像技术发展及展望(特邀)

朱京平^{1,2,3,*}, 邓金鑫^{1,2,3}, 李浩翔^{1,2,3}, 郭奉奇^{1,2,3}, 侯 洵^{1,2,3}

(1. 西安交通大学 电子与信息学部电子科学与工程学院, 西安; 2. 电子物理与器件教育部重点实验室, 西安;
3. 陕西省信息光子技术重点实验室, 西安)

摘 要: 在浑浊介质中进行光学成像时, 由于受介质吸收与散射影响, 目标信号被淹没在背景噪声中, 导致图像的清晰度严重下降。利用光的偏振信息可显著提升浑浊介质中目标的探测能力, 其中偏振差分作为代表性偏振成像技术, 充分挖掘介质光与场景光的偏振特性差异对背向散射噪声实现偏振共模抑制。由于其系统结构简单、可移植性好、适用领域广泛、凸显边缘等优势备受关注。该技术不仅可以作为物理光学成像方法对水下浑浊环境、生物组织、大气雾霾散射环境中目标进行高对比度成像, 还可作为光学传感器件抑制杂散光的有效手段, 从提出至今已积累了大量优秀的研究成果, 从偏振差分成像技术的基本原理出发, 根据成像应用场景的不同从两方面介绍了该技术一系列最新的研究进展, 并对偏振差分成像未来可能的发展方向进行了展望, 期望为该领域的后续研究提供指引。

关键词: 偏振差分成像; 浑浊介质; 偏振共模抑制; 成像对比度

中图分类号: O439

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2022)-05-0001-09

Development and Prospects of Polarization Differential Imaging in Turbid Media (Invited)

ZHU Jingping^{1,2,3,*}, DENG Jinxin^{1,2,3}, LI Haoxiang^{1,2,3}, GUO Fengqi^{1,2,3}, HOU Xun^{1,2,3}

(1. School of Electronic Science and Engineering, Faculty of Electronic and Information Engineering,
Xi'an Jiaotong University, Xi'an, China;

2. Key Laboratory for Physical Electronics and Devices of the Ministry of Education, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, China;

3. Shaanxi Key Lab of Information Photonic Technique, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, China)

Abstract: When optical imaging in turbid media, the target signal is drowned in the background noise due to the influence of media absorption and scattering, resulting in a serious degradation of image clarity. As a representative technique of polarization imaging, polarization differential can significantly improve the detection capability of targets in turbid media by using the polarization information of light, which fully exploits the difference in polarization characteristics between medium light and scene light to achieve polarization common-mode suppression of backscattered noise. Due to its simple system structure, good portability, wide range of applicable fields, highlighting the edge and other advantages have attracted much attention. This technology can not only be used as a physical optical imaging method for high contrast imaging of targets in underwater turbid environments, biological tissues, and atmospheric haze scattering environments, but also as an effective means to suppress stray light from optical sensor devices, and a large number of excellent research results have been accumulated since its introduction. From the basic principle of polarization differential imaging technology, according to the different imaging application scenarios, a series of recent research advances in polarization differential imaging is introduced from two aspects. And an outlook on polarization differential imaging is provided, which provides guidelines for subsequent research in this field.

Key words: polarization differential imaging; turbid media; polarization common-mode suppression; imaging contrast

收稿日期: 2022-10-14

基金项目: 陕西省自然科学基金项目(2018JM6008)

当光在一种介质中传播时,如果此种介质中不存在异质体,那么光线将遵循直线传播规律;但当光在大气、海水、生物组织等一些存在微小散射颗粒的浑浊介质中传输时,吸收效应导致探测距离缩短,选择性吸收导致色彩畸变等问题^[1-2];散射效应改变了光的传输方向,造成严重的“帷幔效应”,导致成像对比度大幅下降。最大程度地消除背景散射光,提高成像对比度、增强目标的探测与识别能力一直是研究者所关注的热点问题。针对吸收与散射问题,目前已形成了一系列有效的光学成像方法,如距离选通成像^[3]、同步扫描成像^[4]、鬼成像^[5]以及偏振成像^[6-7]等。

与其他成像方法相比,偏振成像技术在成像系统体积、成像视场、可移植性等方面均具有技术优势,已成为浑浊介质成像的重要手段。根据成像原理的不同,通常可以将其分为偏振差分成像、基于偏振散射退化模型的偏振成像与穆勒矩阵成像三种,其中偏振差分成像可有效抑制背向散射光,且凸显目标轮廓,从提出至今已有30年,已发展出多种类型的差分模型。从偏振差分成像技术的基本原理出发,以成像应用场景为分类依据,将目前已有的发展成果分为两大类:一是大场景相对远距离的偏振差分成像,如水下、雾霾等宏观环境中的目标探测;二是微观小视场下的偏振差分成像,如皮肤、癌变细胞组织的显微成像。以此为纲要,总结了该技术产生至今国内外的一些典型的研究成果,最后阐述了现有技术存在的一些问题,并对该技术未来的发展方向做了展望。

1 偏振差分成像技术基本原理

偏振差分成像,就是利用两幅偏振图像的作差结果进行成像。它利用不同光矢量的偏振方向的差异来消除某一光矢量以增强图像。图1为偏振差分成像原理图。

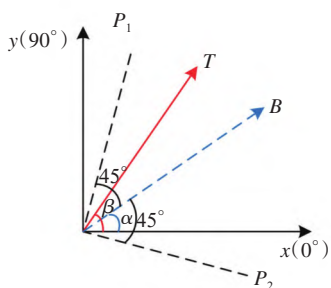


图1 偏振差分成像原理图

如图1所示,假设目标光与背景散射光均为完全线偏振光,将偏振片的透光轴方向转到与背景散射光偏振方向夹角为45°,然后采集两幅正交偏振图像并进行作差,即有

$$I_{\text{pd}} = I(0) - I(90) = T(0) - T(90) + B(0) - B(90) \quad (1)$$

其中,0和90分别代表偏振片旋转至 P_1, P_2 时所对应的两个方向。因为偏振片的透光轴方向与背景光偏振方向夹角为45°,所以有下式

$$B(0) - B(90) = 0 \quad (2)$$

因此,偏振差分成像结果为

$$I_{\text{pd}} = T(0) - T(90) \quad (3)$$

两幅正交偏振态的图像作差可以消除背景散射光,从而实现目标光选通,因此,成像对比度可以获得很大程度的提升。

2 偏振差分成像发展历程

偏振差分成像的出现最早是在1991年9月,美国宾夕法尼亚大学的CAMERON D A等人^[8]研究发现许多无脊椎动物和脊椎动物对光的偏振特性敏感,他们指出双锥体结构是其偏振视觉的基础,并于1995年提出了偏振差分成像概念,并通过实验证明,偏振差分可呈现常规成像不可见的表面特征,成像结果以及像素值曲线如图2所示。

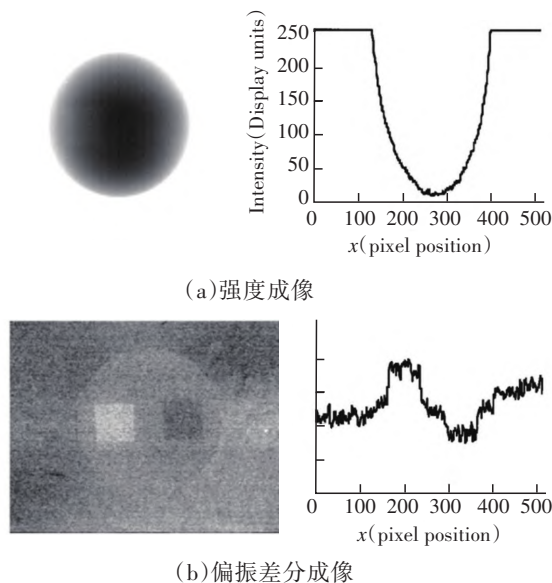


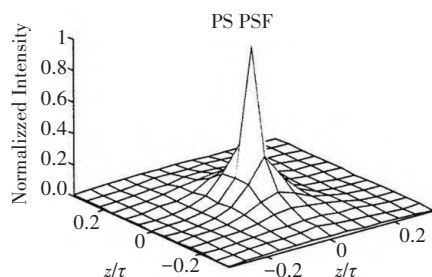
图2 成像结果及其像素值曲线

宾夕法尼亚大学的研究揭开偏振差分成像的序幕,后续研究表明,其应用场景广泛,根据浑浊介质尺度的大小将其分为以水下环境、雾霾等为代表的

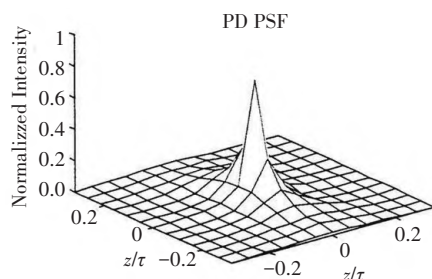
宏观场景成像,和以生物组织为代表的显微成像两大类。

2.1 宏观场景偏振差分成像研究国际进展

从1996年开始,宾夕法尼亚大学的TYO J S开展了系列偏振差分的研究,发现相较于传统的强度成像,偏振差分成像可使成像距离增加2~3倍,并且在高散射环境下可以观测到强度成像无法观测到的目标特征^[9]。1998年,使用偏振差分成像对散射介质中的目标进行色度表示,实现了对弱目标探测与识别能力的增强^[10]。2000年又发现偏振差分图像的点扩散函数更集中,成像质量更高,如图3所示^[11]。



(a) 偏振加和



(b) 偏振差分

图3 偏振差分图像的点扩散函数

同年,英国诺丁汉大学的WALKER J G等人^[12]提出了主动偏振减法成像,在散射介质中实现了对比度增强,并用蒙特卡洛模拟进行了验证。如图4。

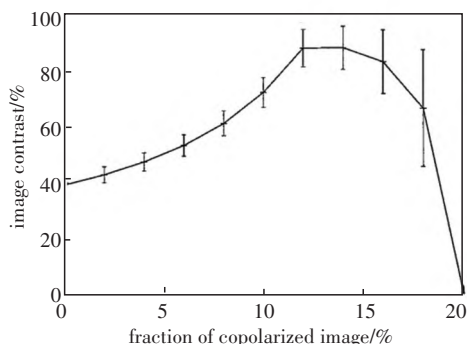


图4 成像对比度与平行偏振态图像比例的关系曲线

2004年,UMESH R S等人^[13-14]比较分析通过散射介质成像的偏振差分成像(PDI)和偏振调制成像(PMI),结果表明,PDI更适用于主动成像,PMI适用于被动成像,并进行了伪彩色可视化融合,如图5。

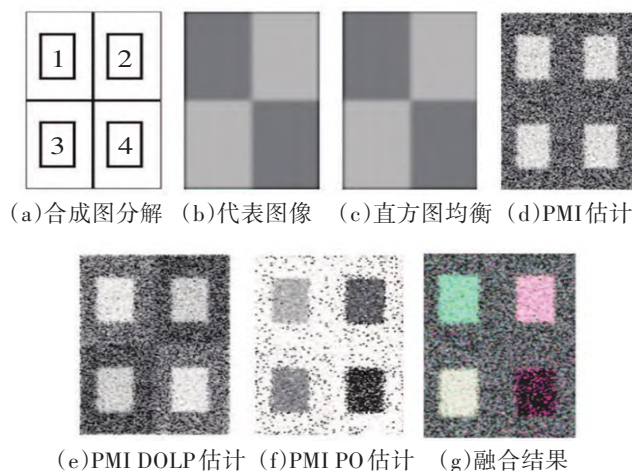


图5 融合可视化参数的结果

2006年,美国宾夕法尼亚大学的YEMELY-ANOV K M等人^[15]基于场景偏振统计的主成分分析提出一种自适应PDI方法。

2012年,美国亚利桑那大学的MILLER D A等人^[16]将偏振差分成像、通道模糊以及傅里叶空间滤波相结合,为稠密的水蒸气遮挡物产生10倍或更高的图像对比度;德国马尔堡菲利普斯大学的BAUM K等人^[17]基于偏振差分成像技术以结构光扫描成像的结合提出了一种非接触扩散光学断层扫描3D表面重建方法,重建结果如图6所示。

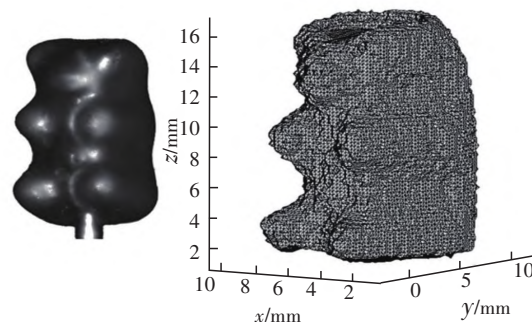


图6 重建结果

2.2 宏观场景偏振差分成像研究国内进展

我国偏振差分成像技术的研究起步于21世纪。2003年,西安电子科技大学的王海晏等人^[18]比较分析了不同成像条件下传统成像与偏振差分成像在目标识别距离以及纹理等方面的差异,如图7所示。

提出通过处理有关偏振差分参量进一步分辨目标和背景的梦想。

图7所示为传统成像与偏振差分成像的结果对比。

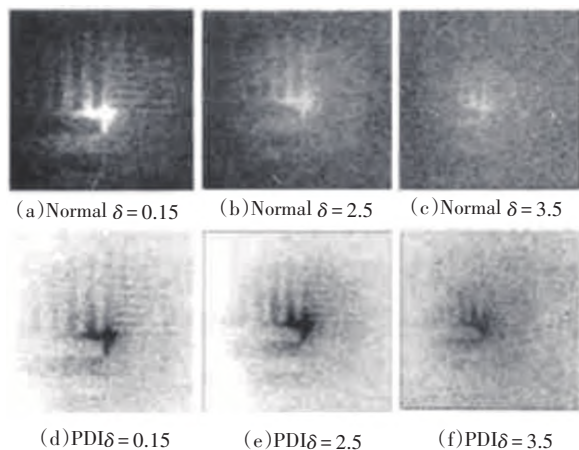


图7 传统成像与偏振差分成像

2010年,福建师范大学的李志芳等人^[19]提出了一种用于光学散射介质中非均匀吸收物体成像的散斑—偏振差分方法,用数学形态学处理抑制散斑粗粒并重建嵌入浑浊介质中的吸收不均匀性的位置,通过平均粒度来量化背景介质的散射系数,应用局部散斑对比度来增强吸收物体的边缘。2011年,中国科学院安徽光机所的周浦城等人^[20]结合信息论的相关方法提出了一种基于最小互信息化的自适应偏振差分成像方法,实现了更好的背景抑制与目标识别,如图8。

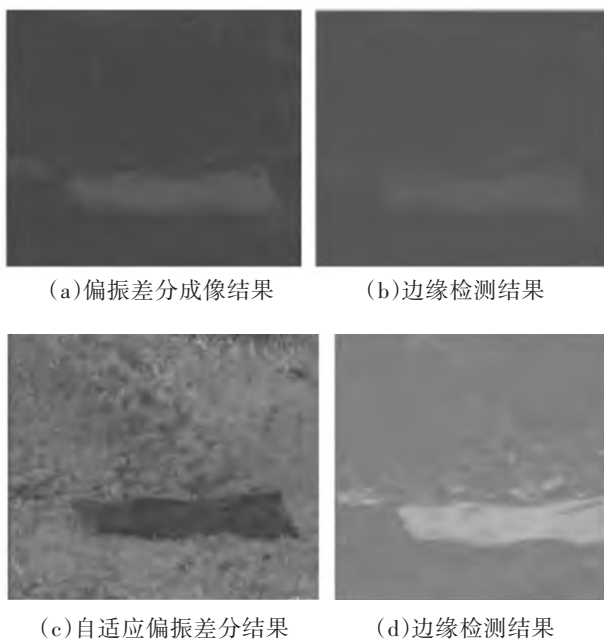


图8 最小互信息化的自适应偏振差分成像

2013年,朱京平团队^[21]提出偏振距离选通成像技术,可有效滤除散射光子,抑制后向散射光,从而提升成像对比度,成像效果如图9所示。

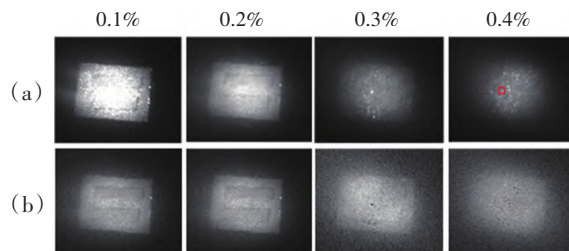


图9 不同浑浊程度下强度成像与偏振距离选通成像结果对比

2015年,朱京平团队^[22]提出了一种基于Stokes矢量寻找最佳偏振主轴的偏振差分成像方法,大大提高了成像的实时性,促进了偏振差分成像的实际应用。如图10所示。

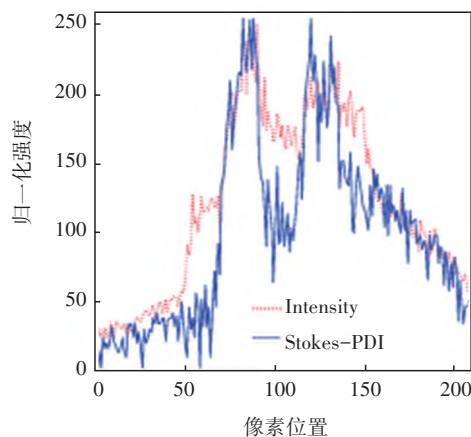


图10 强度图像与偏振差分成像的像素值曲线

同年,上海交通大学的石建宏等人^[23]提出了一种偏振差分鬼成像方法。实验结果表明,该方法可有效分离两种偏振特性不同但视觉效果相似的目标,如图11所示。

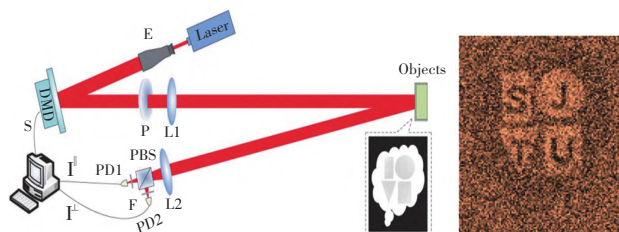


图11 实验装置与成像结果

2016年,朱京平团队^[24]对比分析了浑浊介质中偏振距离选通、偏振差分以及距离选通三种成像方

式的对比度。结果表明,对比度改变相同量时,成像距离偏振距离选通>偏振差分>距离选通>强度成像,如图12所示。

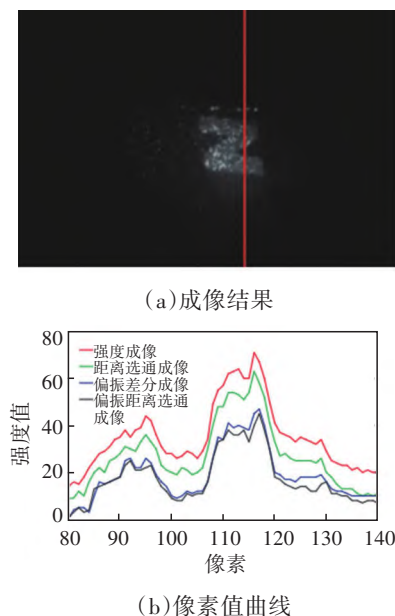


图12 成像结果与像素值曲线

同年,华中科技大学的夏珉等人^[25]对比分析了正交偏振成像和偏振差分成像对于提高水下目标探测能力的效果,结果表明,目标退偏较弱时,偏振差分成像可以提高成像分辨率。

2017年,中北大学的管今哥等人^[26]提出时域偏振差分成像方法,更好地抑制了背景光。成像结果以及像素值曲线如图13所示。

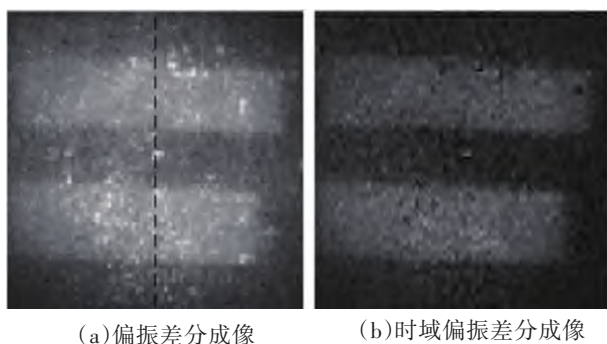


图13 偏振差分成像结果与时域偏振差分成像

同年,朱京平团队^[27]MONTE Carlo 模拟分析了浑浊介质中粒子尺寸对于偏振距离选通成像的影响效果,结果如图14所示。表明圆偏振光比线偏振光提高图像对比度效果更优,各向异性介质对成像效果影响不大。光学厚度定义为浑浊介质散射系数与成像距离之积,即: $\mu_s \cdot d$ 。

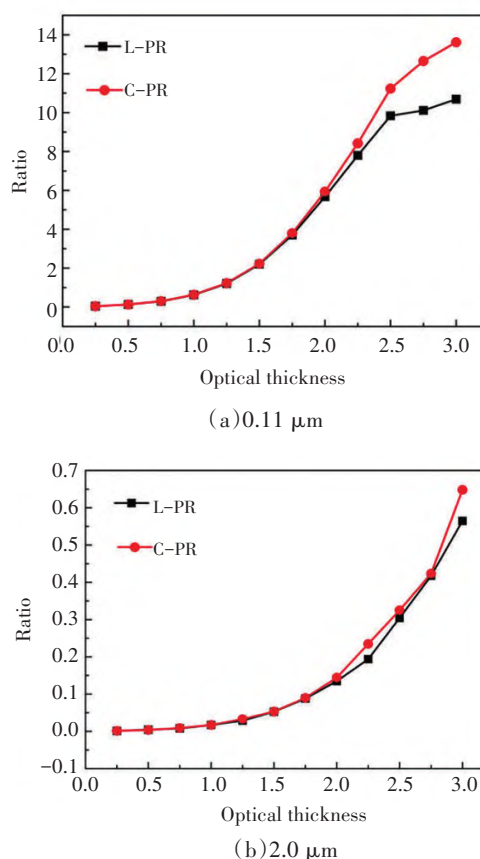


图14 不同粒径浑浊介质中对比度提升程度随光学厚度的变化

2018年,朱京平团队^[28]提出一种无需旋转偏振片寻找最优角度的快速偏振差分成像方法,在提升成像实时性的同时,不影响成像对比度的提升,如图15所示。

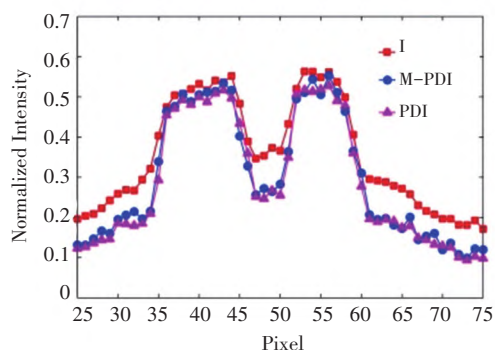


图15 各成像方式像素值曲线

朱京平团队还模拟研究了散射体尺寸参数对双折射浑浊介质中偏振距离选通成像质量的影响^[29],如图16所示。结果表明,圆/线偏振成像在光学厚度值较小/较大效果更好。结果表明,在小粒径散射体形

成的浑浊介质中,圆偏振成像在光学厚度较小时成像效果优于线偏振成像;当散射体粒径较大时,圆偏振成像效果始终优于线偏振成像。

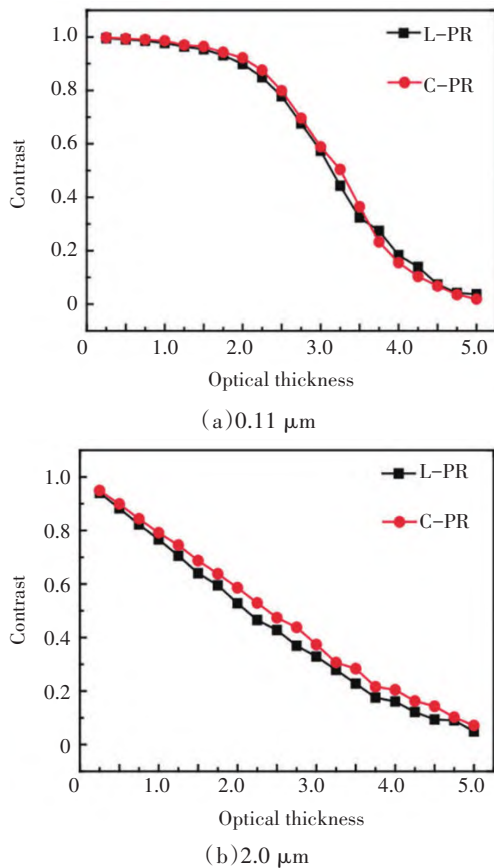


图16 不同粒径双折射介质中对比度随光学厚度的变化

2019年,南京理工大学的刘磊等人^[30]基于边缘信息增强提出一种多尺度图像融合算法来整合来自不同源图像的互补信息和冗余信息,明显提高了图像在信息熵、平均梯度和空间频率的性能,结果如图17所示。

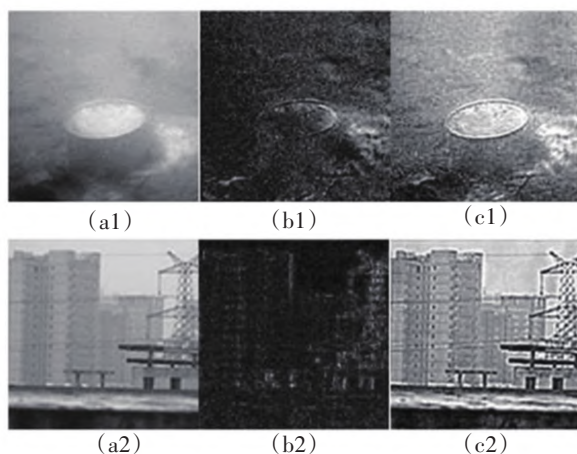


图17 从左至右依次为强度图像、偏振差分图像以及融合图像

2021年,天津大学胡浩丰团队^[31]使用两幅偏振角度不同的图像作差,提出一种三自由度偏振差分成像方法,可以更好地消除背景散射光的影响。如图18。

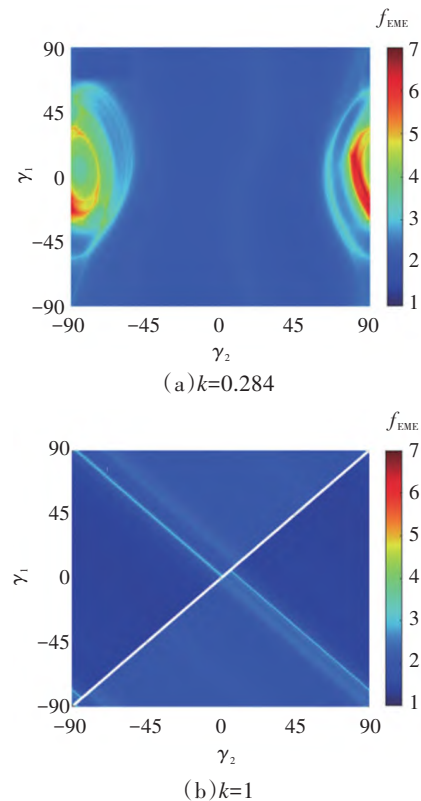


图18 不同 k 值下EME随两个差分偏振图像偏振角度变化图

胡浩丰团队考虑到入射光偏振态对目标偏振差分成像的影响,运用穆勒矩阵运算法则计算出一系列不同偏振态入射时的偏振差分图像,可优选出效果最好的图像^[32]。如图19所示。

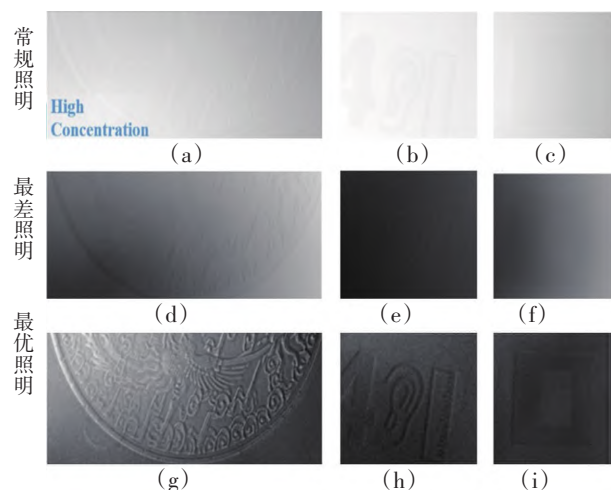
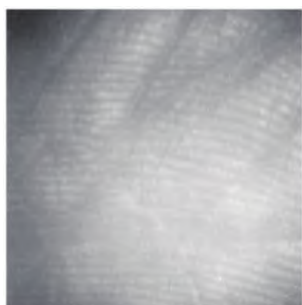


图19 浑浊介质中不同照明情况成像效果

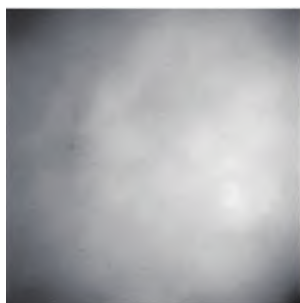
2.3 显微偏振差分成像研究进展

显微偏振差分成像除去尺度的差异外,还存在明显不同。以生物组织成像为例,整个组织是一个成像整体,目标与背景组分上没有明显界限。

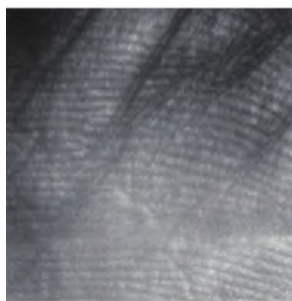
1997年,美国纽约城市大学的 DEMOS S G 等^[33]研究发现,从散射介质中反向散射的光脉冲的平行和垂直偏振分量的时间分布是不同的,光在组织的穿透深度和反向散射光的退偏特性取决于组织的散射和吸收特性。基于这些事实,他们利用偏振差分成像设计了一种用于无创表面和皮下的生物系统成像新技术。成像结果如图 20 所示。



(a) 平行分量图像



(b) 垂直分量图像



(c) 偏振差分图像

图 20 皮肤偏振成像系统成像效果

同年,该研究团队的 WANG W B 等^[34]引入了 Cardio Green 染料的保偏特性和荧光偏振差成像(FPDI)技术。研究发现,荧光偏振差图像的空间

FWHM 分辨率和对比度分别比传统强度图像高 2.3 倍和 3.6 倍,成像像素值曲线如图 21 所示。

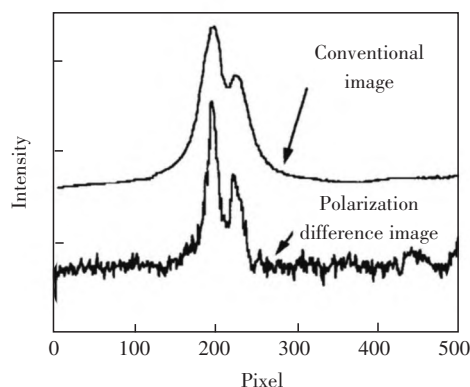
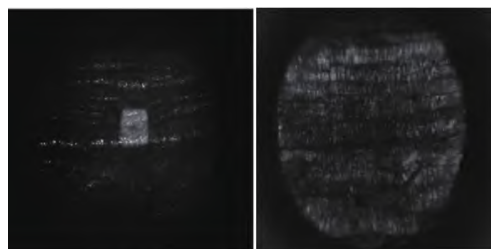


图 21 传统成像与偏振差分成像的像素值曲线

2002年,俄罗斯萨拉托夫国立大学的 KISELEVA I A 等使用低浓度稀释牛奶和正常人体皮肤和有红斑的皮肤,研究了介质散射特性与深度的关系,并获得了其偏振差分反射光谱^[35]。

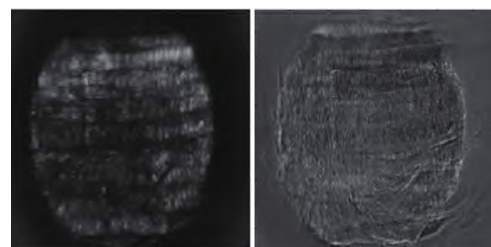
2006年,美国纽约城市大学的 PU Y 等^[36]测量了溶液中以及癌性和正常前列腺组织中 Cybesin 的时间分辨偏振依赖性荧光,并将 Cybesin 保偏的荧光偏振差分成像技术用于增强癌变和正常前列腺组织区域的图像对比度。

2008年,英国诺丁汉大学的 MORGAN S P 等提出一种采用单偏振态的照明和正交偏振检测的无表面反射偏振成像技术^[37],在皮下组织偏振敏感测量达到了 12 个平均自由程深度,获得的牛腱初步图像如图 22 所示。



(a) 共极图像

(b) 0°/90°图像



(c) 90°/0°图像

(d) ROPI 归一化差分图像

图 22 牛腱图像

清华大学深圳研究生院马辉团队在生物组织偏振成像,特别是Muller矩阵成像方面取得了丰硕成果。2006年,研究发现,浑浊介质中偏振差分投影图像(PDPI)对比度优于DOP图像对比度;还提出采用傅里叶空间门提高图像对比度^[38]。如图23。

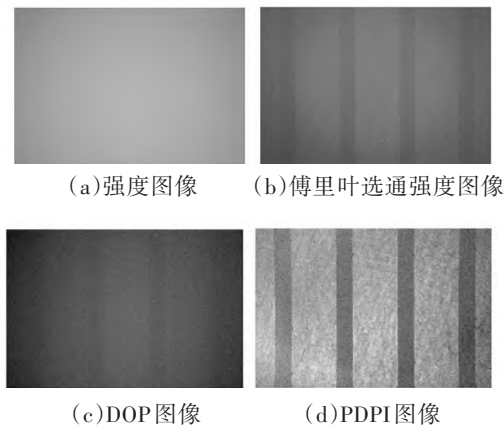


图23 使用不同选通技术的不同投影图像

2007年,该研究团队^[39]提出一种基于旋转偏振角的线偏振扫描成像方法,如图24所示。

探索用该方法获取的系列图像提取特定参数进行样品结构表征;2009年,他们探索了使用偏振差分信息对生物组织的某些结构进行表征,并探讨了其应用潜力^[40]。

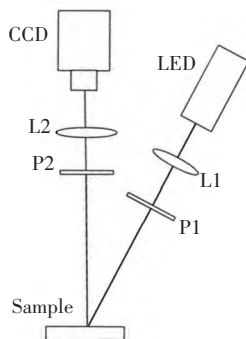


图24 后向散射LPD成像的实验装置

图中L1和L2是透镜,P1和P2是可以绕各自光轴旋转的偏光片。

2014年,他们使用偏振差分成像对小鼠皮肤组织进行了表征,发现偏振图像参数会随着组织吸收、散射特性的改变产生很大的变化^[41]。

3 总结与展望

人们希望依托偏振这一维度的信息来为浑浊

介质的清晰化成像提供行之有效的解决方案,促进偏振成像在水下救援、海底资源勘探、病理诊断等多个领域的应用。相比于已成熟应用的其他光学成像技术,偏振差分成像具有系统体积小、成像视场大、去散射显著等优势,备受研究人员关注。在介绍偏振差分成像基本原理基础上,按照应用场景综述分析了该技术产生至今的一些具有代表性的研究成果,综合来看,经过近三十年的发展,偏振差分成像技术不断地被发展完善,研究人员利用Stokes矢量来提高成像速度、提供多偏振方向的入射光对场景进行照明,或是将其与其他成像技术相结合,进一步提高对背景散射光的抑制能力。在生物组织成像方面,人们借助该技术探究组织特性,从而为医学诊断、病理分析等提供助力。

但是,在现有技术尚存在系列需要提高的方面,包括:

(1)人们更多地通过目标光与背景散射光偏振特性的差异来进行二者的分离,对于二者偏振特性的准确分布关注较少;

(2)整幅图像往往采用同一个偏振方向,尚未良好解决不同位置偏振背景散射光方向不同时最优成像角度提取问题;

(3)偏振差分图像亮度往往不高,会限制其在低亮度环境中的应用;

(4)现有技术基本针对静态目标,运动目标进行成像还有待进一步解决。

这些问题将会成为未来不断推进偏振差分成像技术更新换代的热点方向。推进技术进步不仅需要克服自身的缺陷,还应当与其他技术相结合。因此,探究光的成像机制,借助物理规律调整优化成像技术,将现有技术整合利用,从而实现浑浊介质的清晰化成像是值得科研人员探索的重点问题。

参考文献

- [1] ZHOU J, WEI X, SHI J, et al. Underwater image enhancement via two-level wavelet decomposition maximum brightness color restoration and edge refinement histogram stretching[J]. Optics Express, 2022, 30(10): 17290-17306.
- [2] ZHOU J C, LIU D S, XIE X, et al. Underwater image restoration by red channel compensation and underwater median dark channel prior[J]. Applied Optics, 2022, 61

- (10):2915-2922.
- [3] WANG M M, WANG X W, SUN L, et al. Underwater 3D deblurring-gated range-intensity correlation imaging[J]. *Optics Letters*, 2020, 45(6):1455-1458.
- [4] JAFFE J S. Performance bounds on synchronous laser line scan systems[J]. *Optics Express*, 2005, 13(3):738-748.
- [5] LI Y Z, DENG C J, GONG W L, et al. Polarization difference Ghost imaging in turbid medium[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(15):8.
- [6] 韩平丽, 刘飞, 张广, 等. 多尺度水下偏振成像方法[J]. *物理学报*, 2018, 67(5):10.
- [7] LIU F, HAN P L, WEI Y, et al. Deeply seeing through highly turbid water by active polarization imaging[J]. *Optics Letters*, 2018, 43(20):4903-4906.
- [8] CAMERON D A, PUGH E N. Double cones as a basis for a new type of polarization vision in vertebrates[J]. *Nature*, 1991, 353(6340):161-164.
- [9] TYO J S, ROWE M P, PUGH E N, et al. Target detection in optically scattering media by polarization-difference imaging[J]. *Applied Optics*, 1996, 35(11):1855-1870.
- [10] TYO J S, 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-Optics Image Science and Vision*, 1998, 15(2):367-374.
- [11] TYO J S. Enhancement of the point-spread function for imaging in scattering media by use of polarization-difference imaging[J]. *Journal of the Optical Society of America a-Optics Image Science and Vision*, 2000, 17(1):1-10.
- [12] WALKER 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.
- [13] UMESH R S, RAMAKRISHNAN A G, SRIKANTH R, et al. Estimation theoretic framework for comparing polarization based, continuous-wave direct imaging schemes [C]//International Conference on Signal Processing and Communications (SPCOM), Bangalore, INDIA, 2004: 535-539.
- [14] UMESH R S, RAMAKRISHNAN A G, SRIKANTH R, et al. Polarization-rich continuous wave direct imaging: modeling and visualization[J]. *Applied Optics*, 2006, 45(18):4344-4354.
- [15] YEMYLYANOV K M, LIN S S, PUGH 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.
- [16] MILLER D A, DERENIAK E L. Selective polarization imager for contrast enhancements in remote scattering media[J]. *Applied Optics*, 2012, 51(18):4092-4102.
- [17] BAUM K, HARTMANN R, BISCHOFF T, et al. Three-dimensional surface reconstruction within noncontact diffuse optical tomography using structured light[J]. *Journal of Biomedical Optics*, 2012, 17(12):7.
- [18] WANG H, YANG T, AN Y. The usage of polarity character of underwater laser beam in target image detection[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2003, 32(1):9-13.
- [19] LI Z F, LI H, XIE W M, et al. Granulometric analysis of speckles for polarization-difference imaging in turbid media[J]. *Lasers in Engineering*, 2011, 21(3-4):255-263.
- [20] 韩裕生, 周浦城, 乔延利, 等. 基于最小互信息的自适应偏振差分成像方法[J]. *红外与激光工程*, 2011, 40(3):5.
- [21] GUAN J G, ZHU J P. Target detection in turbid medium using polarization-based range-gated technology[J]. *Optics Express*, 2013, 21(12):14152-14158.
- [22] GUAN J G, ZHU J P, TIAN H, et al. Real-time polarization difference underwater imaging based on Stokes vector[J]. *Acta Physica Sinica*, 2015, 64(22):224203-1-224203-4.
- [23] ZHU Y C, SHI J, YANG Y, et al. Polarization difference ghost imaging[J]. *Applied Optics*, 2015, 54(6):1279-1284.
- [24] TIAN H, ZHU J P, ZHANG Y Y, et al. Image contrast for different imaging methods in turbid media[J]. *Acta Physica Sinica*, 2016, 65(8):084201-1-084201-7.
- [25] 韩捷飞, 夏珉, 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(3):75-83.
- [26] GUAN J G, CHENG Y Y, CHANG G L. Time-domain polarization difference imaging of objects in turbid water[J]. *Optics Communications*, 2017(391):82-87.
- [27] TIAN H, ZHU J P, TAN S W, et al. Influence of the particle size on polarization-based range-gated imaging in turbid media[J]. *AIP Advances*, 2017, 7(9):12.
- [28] TIAN H, ZHU J P, TAN S W, et al. Rapid underwater target enhancement method based on polarimetric imaging[J]. *Optics and Laser Technology*, 2018(108):515-520.
- [29] TIAN H, ZHU J P, TAN S W, TIAN J J, et al. Polarization-based range-gated imaging in birefringent medium: effect of size parameter[J]. *Chinese Physics B*, 2018, 27(12):9.
- [30] ZHAO R X, LIU L, KONG X Y, et al. Multi-scale fu

(下转第43页)

- 2001, 2: 325.
- [36] GUPTA M, NAYAR S K, HULLIN M B, et al. Phasor imaging: a generalization of correlation-based time-of-flight imaging[J]. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 2015, 34(5):1-18.
- [37] ZHAO Y W, WANG X, ZHANG Y X, et al. Polarization-based approach for multipath interference mitigation in time-of-flight imaging[J]. *Applied Optics*, 2022, 61(24):7206-7217.
- [38] 谢雨林. 基于偏振光的结构光三维测量技术稳定编码方案研究[D]. 南昌:华东交通大学, 2021.
- [39] XIAO H, JIAN B, WANG K, et al. Target enhanced 3D reconstruction based on polarization-coded structured light[J]. *Optics Express*, 2017, 25(2):1173-1184.
- [40] HUANG X, LUO Y J, BAI J, et al. Polarimetric target depth sensing in ambient illumination based on polarization-coded structured light[J]. *Applied Optics*, 2017, 56(27):7741-7748.
- [41] ZHU Z M, XIE Y L, CEN Y G. Polarized-state-based coding strategy and phase image estimation method for robust 3D measurement[J]. *Optics Express*, 2020, 28(3):4307-4319.
- [42] 贺嘉伟, 许新科, 孔明, 等. 基于面结构光的金属表面高光抑制方法研究[J]. *中国测试*, 2021, 47(10):7.
- [43] 巨海娟. 主动光照明的目标偏振信息获取及成像增强技术研究[D]. 西安:中国科学院大学(中国科学院西安光学精密机械研究所), 2020:81-98.
- [44] SALAHIEH B, CHEN Z Y, RODRIGUEZ J J, et al. Multi-polarization fringe projection imaging for high dynamic range objects[J]. *Optics Express*, 2014, 28(3):4307-4319.

(上接第9页)

- sion algorithm of intensity and polarization-difference images based on edge information enhancement[J]. *Optical and Quantum Electronics*, 2019, 51(6):24.
- [31] HU H F, LI J Q, LI X B, et al. Underwater polarization difference imaging with three degrees of freedom[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(3):6.
- [32] WANG H Y, HU H F, JIANG J F, et al. Polarization differential imaging in turbid water via Mueller matrix and illumination modulation[J]. *Optics Communications*, 2021(499):8.
- [33] DEMOS S G, ALFANO R R. Optical polarization imaging[J]. *Applied Optics*, 1997, 36(1):150-155.
- [34] WANG W B, DEMOS S G, ALI J, et al. Imaging fluorescent objects embedded inside animal tissues using polarization difference technique[J]. *Optics Communications*, 1997, 142(4-6):161-166.
- [35] KISELEVA I A, SINICHKIN Y P, ZIMNYAKOV D A. Polarization reflectance spectroscopy of the human skin in vivo[J]. *Proceedings of the SPIE-The International Society for Optical Engineering*, 2002(4707):228-235.
- [36] PU Y, WANG W B, ACHILEFU S, et al. Time-resolved fluorescence polarization anisotropy and optical imaging of Cybesin in cancerous and normal prostate tissues[J]. *Optics Communications*, 2007, 274(1):260-267.
- [37] MORGAN S P, ZHU Q, STOCKFORD I M, et al. Rotating orthogonal polarization imaging for tissue imaging [C]//Conference on Optics in Tissue Engineering and Regenerative Medicine II, San Jose, CA, 2008.
- [38] WANG N, SHAO H R, HE Y L, et al. Contrasts of the polarization difference projection images with linearly and circularly polarized lights-art. no. 65340B[C]//5th International Conference on Photonics and Imaging in Biology and Medicine, Wuhan, 2007:B5340-B5340.
- [39] 蒋啸宇, 曾楠, 何永红, 等. 基于旋转偏振角的线偏振扫描成像方法研究[J]. *生物化学与生物物理进展*, 2007, 34(6):659-663.
- [40] ZENG N, JIANG X Y, GAO Q, et al. Linear polarization difference imaging and its potential applications[J]. *Applied Optics*, 2009, 48(35):6734-6739.
- [41] LI D Z, HE H H, ZENG N, et al. Influence of absorption in linear polarization imaging of melanoma tissues[J]. *Journal of Innovative Optical Health Sciences*, 2014, 7(3):1450009-1-1450009-8.