

激光与光电子学进展

基于偏振成像的工业视觉及其关键技术

罗海波^{1,2,3*}, 曹军峰^{1,2,3,4}, 盖兴琴⁵, 丁庆海⁶

¹中国科学院光电信息处理重点实验室, 辽宁 沈阳 110016;

²中国科学院沈阳自动化研究所, 辽宁 沈阳 110016;

³中国科学院机器人与智能制造创新研究院, 辽宁 沈阳 110169;

⁴中国科学院大学, 北京 100049;

⁵河北汉光重工有限责任公司, 河北 邯郸 056107;

⁶航天恒星科技有限公司, 北京 100086

摘要 偏振成像是一种新的光电探测体制, 可以获得比传统成像多一维的信息, 在对透明、高反光/高辐射、无纹理目标的探测中具有独特的优势。虽然偏振成像在天文、遥感及水下成像等领域已得到广泛应用, 但在工业领域还处于探索阶段。为了促进偏振成像在工业领域的推广应用, 总结了偏振成像技术的发展历程和现状、基于偏振成像的工业检测技术以及基于偏振成像的三维测量技术; 在此基础上, 对面向工业视觉的偏振成像关键技术进行了分析, 对相关技术的未来发展方向进行了展望。

关键词 偏振成像; 工业视觉; 缺陷检测; 三维测量

中图分类号 O436.3 文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.1415003

Industrial Vision Based on Polarization Imaging and Its Key Technologies

Luo Haibo^{1,2,3*}, Cao Junfeng^{1,2,3,4}, Gai Xingqin⁵, Ding Qinghai⁶

¹Key Laboratory of Opto-Electronic Information Processing, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, Liaoning, China;

²Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, Liaoning, China;

³Institutes for Robotics and Intelligent Manufacturing, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110169, Liaoning, China;

⁴University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

⁵Hebei Hanguang Heavy Industry Co., Ltd., Handan 056107, Hebei, China;

⁶Space Star Technology Co., Ltd., Beijing 100086, China

Abstract Polarization imaging is a new photoelectric imaging technology that captures more information than traditional imaging technology. It has advantages in measuring transparent, high reflection/radiation, and textureless targets. Polarization imaging is still in the exploratory stage in industries, although it has been widely used in astronomy, remote sensing, and underwater imaging. This paper summarized the development and current status of polarization imaging and industrial detection as well as three-dimensional measurement based on polarization imaging to promote its popularization and application in industries. Further, the key technologies of polarization imaging for industrial vision were analyzed, and the future development direction of the related technologies was explored.

Key words polarization imaging; industrial vision; defect detection; 3D measurement

1 引言

偏振是光的重要物理特性之一。地表或大气中的物体在反射、散射、透射和辐射电磁波时会产生由自身

特性所决定的特定偏振信息, 且这些偏振信息能用于分析物体的形状、表面粗糙度、纹理走向和材料的理化特性等。然而, 传统的成像设备是将光的强度和光谱信息编码成亮度和光谱进行成像的, 不能获得偏振信

收稿日期: 2022-03-30; 修回日期: 2022-04-19; 录用日期: 2022-05-05

通信作者: *luohb@sia.cn

息。偏振成像技术作为一项前沿技术,它在传统成像的基础上增加了偏振维的信息,不仅能提供二维空间的光强分布、光谱谱线,还能获得偏振信息,不但在军事上有广泛的应用,在天文、遥感以及工业视觉领域也有独特的应用价值。因此,本文对偏振成像技术在工业视觉领域的典型应用、代表性成果以及关键技术进行总结和分析,为补充和丰富工业检测和测量的技术手段提供参考,具有较重要的理论和现实意义。

表 1 典型偏振成像方法的技术特点^[1]Table 1 Technical characteristics of typical polarization imaging methods^[1]

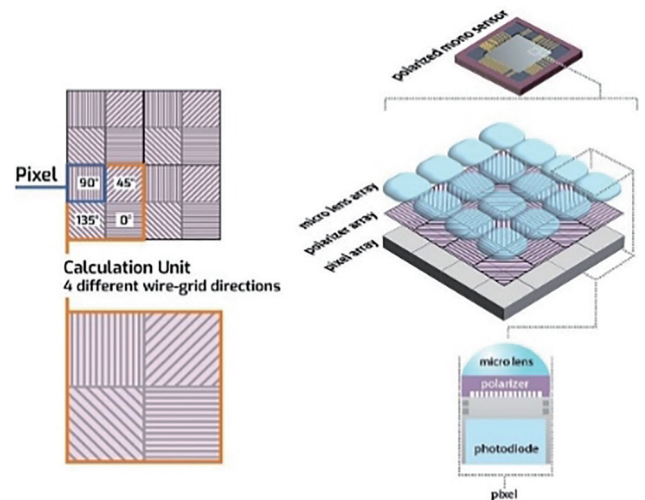
Method	Design feature	Fabrication-integration Issues, Cost	Misregistration issue
Rotating element	<ul style="list-style-type: none"> • Robust • Relatively small • Not suitable for dynamic scenes 	<ul style="list-style-type: none"> • Easiest to implement • Inexpensive 	<ul style="list-style-type: none"> • Scene and platform motion • Beam wander not a problem or removed in software • Misregistration is linear
Division of amplitude (multiple FPAs)	<ul style="list-style-type: none"> • Simultaneous acquisition • Large system size 	<ul style="list-style-type: none"> • High mechanical flexibility and rigidity required • Expensive • Large 	<ul style="list-style-type: none"> • Must register multiple FPAs • Misregistration can be fixed • Can be nonlinear
Division of aperture (single FPA)	<ul style="list-style-type: none"> • Simultaneous acquisition • Smaller size 	<ul style="list-style-type: none"> • Loss of spatial resolution • Expensive 	<ul style="list-style-type: none"> • Fixed misregistration • Can be nonlinear
Division of focal plane	<ul style="list-style-type: none"> • Simultaneous acquisition • Small and rugged • Loss of spatial resolution 	<ul style="list-style-type: none"> • Fabrication difficult • Alignment difficult • Very expensive 	<ul style="list-style-type: none"> • IFOVs misregistered • Requires interpolation • Fixed registration
Coboresight	<ul style="list-style-type: none"> • Simultaneous acquisition • Best used at long ranges 	<ul style="list-style-type: none"> • Easy integration • Expensive 	<ul style="list-style-type: none"> • Misregistration not as stable

20 世纪 70 年代出现了用照相胶片记录图像的分时型偏振成像技术;20 世纪 80 年代,随着电视摄像管和 CCD 成像传感器技术的发展,该技术的探测能力得到了较大提高。1999 年,日本国家航空实验室研制了可见光波段的偏振光谱成像仪,采用电调滤光片加电机旋转的方式获取图像,并于 2003 年将波段扩展到了近红外波段^[2]。2000 年,美国陆军研究实验室报道了长波红外偏振热成像仪^[3],之后法国 Thales 公司也相继报道了长波红外焦平面偏振探测器及其偏振成像仪^[4]。2011 年,美国亚利桑那大学联合其他大学研制了一种基于宽带偏振光栅的白光通道型偏振成像仪^[5]。美国 4D 公司研制了可见光波段的微型线偏振相机^[6],其偏振阵列的工作波段为 0.3~3 μm。2012 年,美国报道了圆偏振滤光片的研究成果,集成的微偏振阵列能同时获得圆偏振光和线偏振光。2017 年,中国科学院西安光学精密机械研究所研制了分孔径全偏振态同时探测型实时彩色偏振成像相机^[7],可用于对高速移动目标的探测与跟踪。2018 年,西北工业大学赵永强教授团队和北方广微联合研制了一款长波非制冷型分焦平面红外偏振相机^[8]。Sony 推出了 IMX250 MZR 和 IMX250MYR 等系列偏振成像传感器^[9],其主

2 偏振成像发展历程与现状

国外在 20 世纪 70 年代就开始了偏振成像技术的研究,经过数十年的发展,偏振成像技术取得了长足的进展。从实现的技术途径看,偏振成像主要有分时型(包括机械旋转偏振片、波片型和液晶调制型等)、分振幅型、分孔径型、分焦平面型和通道调制型,表 1 为这些成像方式的典型特征总结。

要特点是每个微偏振片都有防反射层,且被置于显微镜和感光二极管之间,如图 1 所示,该结构能最大程度地减少不同方向偏振光的串扰。FLIR 和 Lucid Vision Labs 等将其集成到相机中,研发出了相应的黑白和彩色分焦平面偏振相机。

图 1 分焦平面偏振传感器 IMX250MZR 结构示意图^[9]Fig. 1 Schematic of division-of-focal-plane IMX250MZR polarimeter^[9]

2020年,中国科学院上海技术物理研究所成功研制了集成亚波长金属光栅结构的近红外 InGaAs 偏振探测器^[10],偏振光敏元的消光比优于 20:1。中国科学院沈阳自动化研究所先后于 2015 年和 2020 年成功研制了制冷型中波红外偏振焦平面探测器和制冷型长波红外偏振焦平面探测器,在此基础上研制了中波和长波红外偏振成像系统,并完成了应用研究。近些年来,借鉴螳螂虾、水蚤等水生生物对偏振光敏感的独特结构,有学者提出了仿生偏振技术^[11-12]。

3 偏振成像与工业视觉

在工业视觉领域,偏振成像主要用于工业检测和工业测量,特别是对透明、高反光/高辐射、无纹理工件的表面质量检测 and 三维测量,比传统成像体制有明显的优势。

3.1 基于偏振成像的工业检测技术

由于物体反射/辐射电磁波的偏振态主要取决于其形状、表面粗糙度、纹理走向、材料的理化特性、内部

晶格排列等,偏振成像对辐射强度的变化不敏感,所以可用于检测透明材料内部和表面缺陷,这些缺陷在强度图中往往很难显现。对于高反光/高辐射材质,在对其进行成像时容易出现饱和、缺陷成像对比度低等现象,给检测系统的架构和算法设计带来了诸多挑战;而表面特性的变化会引起偏振态的剧烈变化,所以偏振成像在高反光/高辐射工件的表面缺陷检测方面比传统成像方法具有明显的优势。此外,金属等塑性材料在循环加载过程中,由于位错滑移而在表面产生随机分布的表面起伏,这些变化也会导致反射/辐射电磁波的偏振态的变化,利用该特性,偏振成像还可用于对材料疲劳损伤的评估。

图 2 为传统成像和偏振成像对手机玻璃屏的成像结果,可以看出,偏振成像可以将传统成像不能分辨的划痕显现出来;同时,从偏振成像结果还可以看出,玻璃表面存在人眼视觉和传统机器视觉难以分辨的不平整性,导致各点法线方向不平行,这些微小变化在偏振成像结果中很直观地被显现出来。

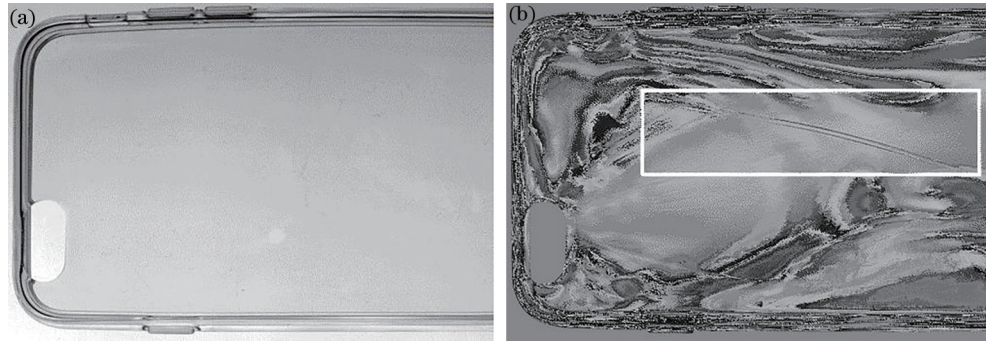


图 2 传统成像和偏振成像对玻璃的成像结果。(a)传统成像结果;(b)偏振成像结果

Fig. 2 Traditional imaging and polarization imaging for glass. (a) Traditional imaging; (b) polarization imaging

文献[13]发表了一种光电探测器表面损伤状态偏振成像检测系统,理论推导了“猫眼”目标回波偏振特性参数(DP)和回波偏振度(DOP)的表达式,设计了一套偏振成像光学系统。通过光学显微镜和白光干涉仪对探测器表面损伤处和未损伤处的图像进行分析,发现探测器损伤表面可见硅基底,且三维形貌图的均方根偏差值较大,对比实验结果表明,仿真结果与实测结果具有良好的一致性。光电探测器被损伤后,其表面粗糙度增大,DP减小,退偏特性明显,DOP减小。实验结果表明,偏振成像技术可实现对光电探测器表面损伤状态的实时评估。针对在复杂背景中快速识别金属碎屑的需求,文献[14]研究了主动照明下线偏振成像用于区分金属和非金属的方法和条件,提出了一种利用多波段线偏振成像快速识别金属碎屑的方法。通过理论分析和实验验证,证明了多波段线偏振成像方法能够在复杂现场快速识别金属碎屑;同时还进行了金属分类的实验,结果表明,在金属分类方面,多波段线偏振成像具有一定的发展潜力。图 3 为该文展示的实验结果,将铁、铝、铜碎屑、泥沙、橡胶、布料等混合在

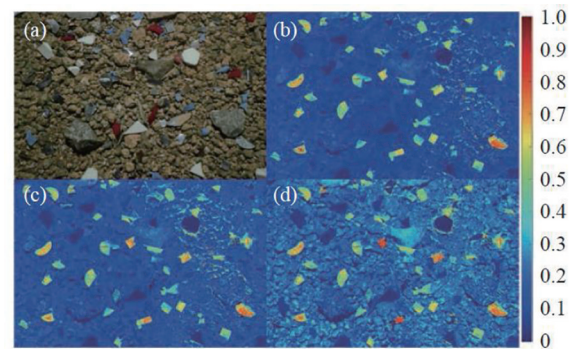


图 3 铁、铝、铜碎屑、泥沙、橡胶、布料的成像结果^[14]

Fig. 3 Imaging of iron, aluminum, copper, silt, rubber, and cotton materials^[14]

一块,用 30°线偏振光照射,通过偏振成像解算出线偏振度(DOLP)图像。图 3(a)为彩色图像,图 3(b)~(d)分别是红、绿、蓝通道的 DOLP 伪彩色图像,从中可以看出,金属的 DOLP 明显大于背景值;同时还可以看出,在不同的探测波段下,金属成像的 DOLP 值也略有不同。总体而言,金属与背景的 DOLP 值差异显

著,并且红色通道下的 DOLP 值与背景差异最大,选择红色通道的图像可以更好地识别金属。

文献[15]在热成像检测的基础上融入偏振探测技术,综合利用金属试件在疲劳损伤过程中的红外偏振特征,提出了一种基于表面红外偏振成像的金属疲劳损伤评估方法。以 Q235 低碳钢平板试件为研究对象,通过搭建红外偏振成像疲劳损伤检测实验系统,分析了金属疲劳过程中表面形貌及温度特性的变化,给出了金属疲劳过程中表面热红外偏振特征的提取方法,利用主成分分析(PCA)法选择图像均值及方差表征金属疲劳过程中红外偏振图像的特征量,建立了基于反向传播(BP)神经网络的非线性预测模型,并对金属构件的疲劳损伤程度进行评估。文献[16]开展了疲劳损伤过程中金属表面偏振热像纹理特征实验研究,搭建了拉伸疲劳实验平台和偏振热像采集平台,以 Q235 低碳钢材料为研究对象,获取循环载荷作用下金属材料表面的热红外偏振图像,利用灰度共生矩阵提取不同偏振方向的图像、偏振度及斯托克斯矢量等热像纹理信息,分析金属疲劳过程中金属材料的表面形貌的演化过程。针对油桃表面颜色特征复杂带来的早期机械损伤难以检测的问题,文献[17]提出了一种基于偏振成像的早期损伤检测分类模型。采用分焦平面偏振成像方法一次性获取油桃 4 个方向的偏振图像,利用双线性插值和低照度增强对偏振图像进行预处理,以提高实时性并降低水果曲率变化的影响;在此基础上,提取偏振图像中像素的颜色特征和灰度共生矩阵特征,分别用于训练两个最小二乘支持向量机分类模型;最后将上述两个分类模型串联起来,实现了油桃机械损伤的早期检测。实验结果表明,该方法对油桃正常和损伤区域的检测精度达 95.68%,召回率达 93.29%,证明分焦平面偏振成像技术在深色系水果的早期损伤无损检测领域具有良好的应用前景。

Sarkar 等^[18]设计了一款 CMOS 图像传感器,使用线栅检测偏振信息,用不同方向的线栅检测不同偏振方向的光强度。该传感器的结构如图 4 所示,传感器分成三个区域,一个 64×128 的区域不加偏振光栅,另外两个 64×64 的区域分别被划分为 32×32 个 2×2 的超像素;一个区域获取强度信息、 0° 和 90° 两个方向的偏振信息,另一个区域获取强度信息、 0° 、 45° 和 90° 三个方向的偏振信息;传感器在两个具有检偏功能的感测区的消光比分别达 6.3 和 7.7。该传感器能够根据反射光的偏振模式引起的强度变化区分不同的反射面,其探测结果可用于表征材料的表面类型。还可以通过该探测器获取图像测量最大和最小透射辐照度的变化幅度、线偏振度、偏振菲涅耳反射比,这些特征可用于对金属和电介质进行分类。

面向高端透明材料制造过程中的在线损伤检测应用需求,文献[19]提出了一种利用脉冲激光和高速偏振相机快速检测透明材料损伤的方法。该方法将一束

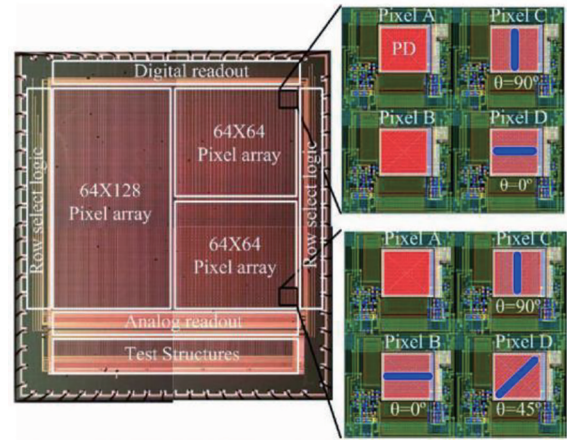


图 4 CMOS 传感器功能划分示意图^[18]

Fig. 4 Schematic of CMOS sensor function division^[18]

高能激光聚焦在材料表面附近,通过脉冲激光产生冲击波,在目标结构上产生应力波,当应力波在材料中传播时,使用具有微秒时间分辨率的高速偏振成像相机获取光穿过被测样品时的偏振态,进而解算出与材料的机械应力分布直接相关的参量。他们采用带有损伤(例如凹痕或划痕)的丙烯酸板对该方法进行了验证,实验结果表明,该方法可以在数微秒的短时间内准确检测到材料的损伤。

3.2 基于偏振成像的三维测量技术

三维工业测量技术主要分为接触式测量和非接触式测量。接触式测量通过测量仪器的探针在被测表面滑移进行测量,测量速度较慢,且探针容易划伤被测表面。非接触测量技术主要包括飞行时间(TOF)法、经纬仪法、摄影测量法、三维坐标测量法、激光干涉法、全息术比长法、测量显微镜法及断面投影法等光电测量技术,是目前广泛使用的技术。基于偏振成像的三维测量技术有两种技术途径,一是通过偏振成像,以物体的偏振态作为形貌的固有特征,建立偏振态参数与平面法向量之间的表达式,从而实现三维重建和三维形貌测量;另一技术途径是将偏振相机集成到相位测量系统中,实时测量工件表面各微面元反射光的相位信息,从而实现三维重建和三维形貌测量。基于偏振成像的三维测量技术可以有效克服传统成像方法在对镜面和透明物体进行测量时,容易受反射和折射等效应影响以及背景影响的缺点。

3.2.1 基于偏振信息的三维重建技术

由于目标表面微面元的三维轮廓与其法向量之间具有唯一性,而由菲涅耳定律可知,物体表面微面元法线方向与出射光偏振特性之间具有密切关系,因此通过求解目标出射光的偏振参量即可得到目标表面微面元的法向量信息,从而实现对目标三维轮廓的重建。在实际求解微面元法向量的过程中,需要分别对偏振特性参量、入射角 θ 和方位角 φ 进行求解。利用目标表面微面元出射光偏振度 P 和目标表面反射率信息,

能够实现对入射角 θ 的估计。同时,当出射光的电矢量振动方向位于入射光平面内时,探测器接收到的光强度值最大,因此可通过旋转偏振片,获取对应最大光强度时的偏振片旋转角,进而实现方位角 φ 的求解,其法向量获取过程如图 5 所示,文献[20-25]从不同的方面分别介绍了偏振三维成像的相关基础理论。值得注意的是,在基于镜面反射的偏振三维成像过程中,反射光垂直方向的振动分量大于平行方向,而漫反射过程中反射光分量特性正好相反,因此需要对不同类型的目标表面出射光分别进行详尽的分析^[20]。

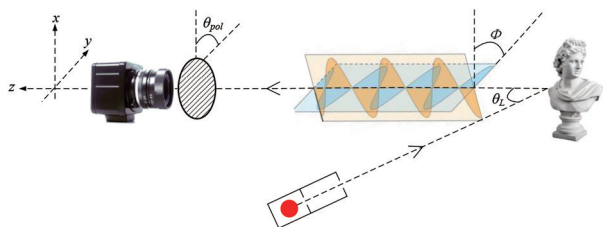


图 5 偏振三维成像过程示意图

Fig. 5 Measurement process of polarization 3D imaging

文献[26]提出了一种采用偏振成像技术对透明物体前后表面进行三维测量的方法,该方法将从畸变信息中恢复形貌和从偏振信息中恢复形貌两种镜面三维重建方法组合在一起。当每个透明表面反射和透射入射光时,通过观察附近两个表面上反射的图案可以看到两个移动的图像。用经过校准的摄像机观测一个已知点源在前表面上的反射,该表面的深度和方向可以在一维解空间内确定。但这种方法无法避免深度的歧义性,为了解决该问题,文中利用偏振度取决于入射角这一特性,利用反射光的偏振信息来消除这种歧义性。文献[26]还证明了从物体后表面观察到的反射在位置和方向之间存在相同的模糊性,这种模糊性可以通过光线追踪和穆勒算子再次消除。通过在真实物体上的验证实验,结果表明,该方法能够在只有一幅偏振图像的情况下测量透明物体两个表面的位置和方向。文献[27]提出了一种采用精确傅里叶梯度场积分提高基于偏振的透明表面形貌重建精度的方法。基于傅里叶变换的梯度场积分方法可以有效地从偏振法测量的梯度数据中重建透明表面。然而,由于微分算子具有较大的截断误差,且对相邻高度没有约束,从而会增加重建误差。针对该问题,文献[27]通过限制截断误差和在算子中增加高度和斜率来构建新的微分算子。为了更新算子获得的数据以满足离散傅里叶变换的周期性和尺寸要求,提出了一种先进行反对称扩展,再进行周期性扩展的方法来扩展原始梯度数据。相对于 Frankot-Chellappa, Southwell-FT 和 Simpson-FT 等基于傅里叶的方法,文献[27]的方法具有更高的精度,在重构实验中,球面重构误差从 0.065~0.081 mm 减小到了 0.020 mm,自由曲面重构误差从 0.060~0.12 mm

减小到了 0.016 mm。

针对自然条件下采用单一视图准确恢复非朗伯体表面形状的应用需求,文献[28]提出了一种非朗伯曲面的单目 3D 偏振成像方法,通过研究镜面反射和漫反射的差异,采用独立成分分析(ICA)法准确估计漫反射分量。通过分离出的纯漫反射分量可以实现精确的偏振提取,进而基于此导出梯度场来确定曲面法向量,并通过求解带有参考梯度场的优化问题来消除模糊。论文用在受控光照下的人造物体和在自然光照下的人脸对该方法进行了实验验证,对其性能进行了评估,实验结果表明,该方法可以达到微米级的深度分辨率。文献[29]发表了一种基于偏振成像(PI)和双目立体视觉(BSV)融合的高质量三维重建方法。为了解决偏振成像中的方位模糊问题,该方法首先在双目深度配准的基础上,通过修正方位角误差来生成偏振面。然后,提出了一种用于深度信息融合的联合三维重建模型,该模型包括一个数据拟合项和一个鲁棒的低秩矩阵分解约束。前者通过假设纹理之间的线性关系将其从偏振信息转换为待融合的深度信息,而后者考虑到缺失项和异常值的影响,将双目深度信息的低频部分用于深度信息的融合,以提高对深度信息的求解精度。针对模型中的优化问题,采用交替方向乘法(ADMM)对其进行求解。论文通过实验证明了该方法能够生成具有精细纹理的精确三维重建结果,并展示了其在三维重建中的应用场景。

3.2.2 基于偏振成像的相位测量技术

相移技术常被用在光学测量中,以获得待测量的相位信息,通过相位反演被测物体的表面形貌。相移技术主要分为基于时间的相移^[30]和基于空间的相位解调^[31-32]两大类。基于时间的相位测量方法可获得更高的精度,然而该方法需要多次移相才能求解相位信息,不适用于动态测量,且实时性欠佳。而偏振成像可以一次成像获得不同偏振角度下的光强信息,因此可以实现实时相位测量。

文献[33]提出了一种基于偏振成像的相位测量系统,该系统的主要思想如图 6 所示。He-Ne 激光器(波长为 632.8 nm)发出的激光经准直镜头 L1 准直后被偏振片 P 转换为线偏振光照射到偏振分光棱镜(PBS)上,PBS 将入射光分解为两束相互垂直的线偏振光。反射的线偏振光经四分之一波片(QWP1)后垂直照射到光滑的参考镜面(reference mirror)上,作为参考光。透射的线偏振光经四分之一波片(QWP2)后照射到用于模拟目标的变形镜(DM)上,称为物光波。反射的物光波和参考光再次经过四分之一波片后照射到 PBS 上,经 PBS 反射和透射后,进入四分之一波片(QWP3),分别被调制为左旋和右旋圆偏振光。然后成像镜头 L2 将待测量的表面成像在偏振相机的焦平面上,采集的光强响应可以表示为

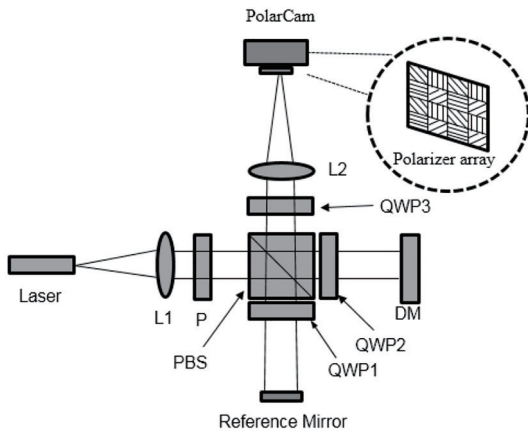


图 6 基于偏振成像的相位测量系统的结构图^[33]

Fig. 6 System layout of polarization imaging-based phase measurement^[33]

$$I(\alpha) = \frac{1}{2} \left[I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(\varphi + 2\alpha) \right], \quad (1)$$

式中： I_1 是物光波的光强， I_2 是参考光的光强； φ 是待测的相位； α 对应不同方向的偏振角。将 $\alpha \in \{0^\circ, 45^\circ, 90^\circ,$

$135^\circ\}$ 代入式(1)可得

$$\begin{cases} I(0^\circ) = 0.5(I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \varphi) \\ I(45^\circ) = 0.5(I_1 + I_2 - 2\sqrt{I_1 I_2} \sin \varphi) \\ I(90^\circ) = 0.5(I_1 + I_2 - 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \varphi) \\ I(135^\circ) = 0.5(I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \sin \varphi) \end{cases}. \quad (2)$$

由式(2)可得

$$\varphi = \arctan \left[\frac{I(135^\circ) - I(45^\circ)}{I(0^\circ) - I(90^\circ)} \right]. \quad (3)$$

式(3)中，反正切函数将相位 φ 的值域限制为 $(-\pi/2, \pi/2)$ ，但实际求解时，可以通过分子分母的符号(象限)将相位 φ 的值域扩展到 $(-\pi, \pi)$ 。即便如此，因实际的相位会超过 2π ，真实的相位被限制在固定区间，导致信息丢失，工程中将这种现象称为缠绕。为了获得真实的相位信息，还需要进行相位解缠绕(phase unwrapping)处理，图7为基于偏振成像的相位测量流程。

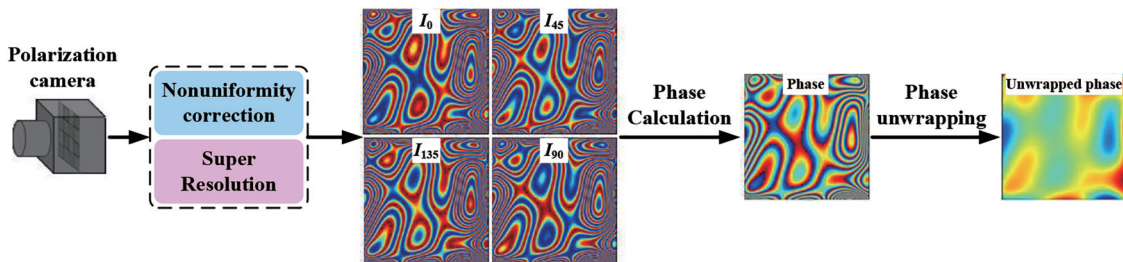


图 7 相位测量的流程

Fig. 7 Flowchart of phase measurement

文献[34]提出了一种快照式多波段三维测量系统，该系统使用集成线偏振阵列和具有拜耳滤光片的 CMOS 相机，实现对大垂直范围不连续结构和表面粗糙度的高速测量。该系统可同时获取不同颜色通道的相移图，通过不同颜色通道的相移信息的融合，扩大了系统的无缠绕测量范围。

图8为该系统原理框图，红(R)、绿(G)和蓝(B)三种颜色的发光二极管(LED)提供多波段照明；在LED前面分别加中心波长为460, 540, 630 nm, 带宽为10 nm的带通滤光片。LED发出的光通过透镜L1准直，然后通过偏振片P起偏后照射到偏振分光棱镜(PBS)上，线偏振光经PBS后被分离为p偏振光和s偏振光。MO1和MO2为两个具有0.28数值孔径(NA)的显微物镜，两束光在返回到PBS之前，以快轴与水平轴成 45° 的角度两次通过消色差四分之一波片QWP1或QWP2。快轴与水平轴成 45° 的QWP3放置在相机前面，将两束正交的线偏振光转换为左旋和右旋圆偏振光。透镜L2将测试表面成像到探测器上。采用彩色偏振相机(PolarCam)同时获取R、G和B通道中的偏振信息，进而求解三个通道的相移，通过使用

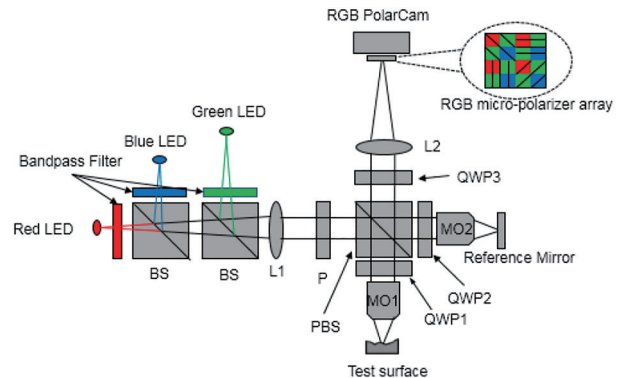


图 8 多波长快照式显微镜原理框图^[34]

Fig. 8 System layout of snapshot multi-wavelength microscope^[34]

两个或三个波段的相移消除 2π 模糊，最后得到被测物体的三维形貌。经理论分析，该系统的无缠绕测量范围约为 $4.222 \mu\text{m}$ 。采用VLSI标准台阶样件对其进行了验证，10次测量结果的平均台阶高度为 1720.51 nm ，标准偏差为 0.54 nm ；而ZygoNewView 8300白光干涉显微镜(测量结果作为标准值)对该样件的测量结果为

1722 nm,二者相差 1.49 nm。

为了进一步扩大测量范围,论文还搭建了如图 9 所示的测量系统,将蓝、绿通道的 LED 换成红、绿、蓝三通道激光器,保留红色通道的 LED,经理论分析,无缠绕测量范围可以达到约 $10.5\ \mu\text{m}$ 。他们利用该系统测量了一个金刚石车床车削的台阶高度为 $3\sim 10\ \mu\text{m}$ 的铜表面,并与 ZygoNewView 8300 白光干涉显微镜的测量结果进行了对比,对比结果表明,其测量误差在台阶高度的 0.26% 以内。

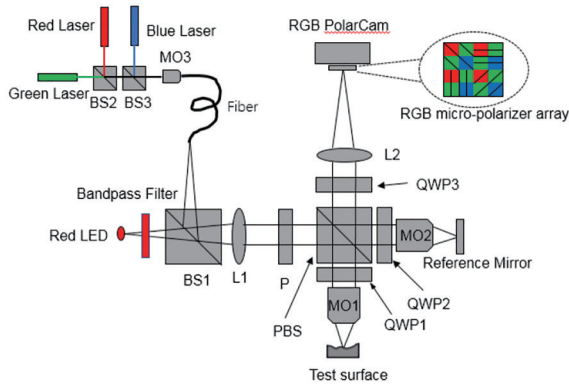


图 9 以 RGB 三色激光和红色 LED 为光源的显微镜原理框图^[34]

Fig. 9 System layout with RGB laser and red LED as source^[34]

4 关键技术及解决思路

偏振成像在工业视觉领域有独特的优势,但在实际应用中还有一些关键技术需要重点关注,主要包括高消光比偏振探测技术、非均匀性校正、超分辨率成像等。

4.1 高消光比分焦平面偏振探测技术

信息获取是信息利用的基础,高质量信息获取是提高视觉系统性能的重要保证。基于偏振成像的工业视觉系统利用目标和场景的偏振信息进行视觉检测和测量,因此偏振信息获取是关键环节之一。消光比是偏振成像探测系统的一个关键指标,它反映了探测系统的检偏性能和交叉耦合深度等特性,决定着偏振信息的利用效率。对于分时型、分振幅型和分孔径型偏振探测方式而言,探测系统的消光比主要取决于偏振片的消光比,而分焦平面型偏振探测器由于相邻像元分别探测不同方向的偏振信息,且像元间距较小,所以交叉耦合导致的消光比退化问题不可忽视。当前国际领先的分焦平面偏振探测器是 Sony 的 IMX250MZR,其消光比达 300:1 以上,国内目前还没有突破 50:1。影响消光比指标的因素主要有偏振光栅自身的性能以及装配工艺,偏振光栅的性能可通过优化设计参数和加工工艺提高。装配工艺性能退化则需要通过提高对准精度、减小偏振光栅和感光单元的间距来优化^[35]。此外,通过在微偏振阵列前集成微透镜阵列,以减小反

射和相邻像元间的交叉耦合也是提高探测器等效消光比的一条有效途径。

4.2 非均匀性校正技术

偏振探测器的非均匀性是一个不可忽视的问题,主要是探测器的响应不一致性和微偏振光栅的不一致性导致的,是一个复合非均匀性问题。随着半导体工艺的发展,目前 CCD 探测器的响应不一致性基本可以忽略,但 CMOS 探测器的响应不一致性和盲元问题还需引起足够的重视,尤其是红外焦平面探测器,其响应不一致性和盲元问题还比较突出。微偏振光栅的不一致性问题则是制造工艺导致的,目前的微纳加工工艺还不能完全解决。现有的非均匀性校正算法未考虑探测器响应的非线性和像元间的串扰,校正模型有待于进一步优化。需要对探测器焦平面响应非线性、微偏振片调制非一致性和像元间串扰等复杂的耦合关系进行建模与分析,在此基础上,研究校正精度更高的非均匀性校正算法。

4.3 超分辨率成像技术

目前比较通行的偏振成像方法为分焦平面偏振成像,由 2×2 (黑白成像) 或 4×4 (彩色成像) 的像元阵列组成超像素,获得单波段或多波段 Stokes 矢量。这种方式会导致空间分辨率降低,这个问题可以通过使用像素更多和像元更小的传感器部分解决,也可以通过超分辨率重建技术来恢复成像分辨率。目前已出现了多类用于偏振成像超分辨率重建的方法,如采用 Newton 多项式插值和偏振残差模型的方法^[36]、利用偏振通道差分先验对分焦平面偏振探测器获取的偏振图像进行超分辨率重建的方法^[37]、基于稀疏编码的方法^[38]、基于张量非负稀疏分解的方法^[39]、基于神经网络的方法^[40-43]等。在上述方法中,基于深度学习的超分辨率重建方法较其他方法在仿真数据上取得了更好的结果。然而,这类方法主要是基于仿真数据对深度学习网络进行训练和测试的,还不能真正反映实际分焦平面偏振探测器的特性,导致这类方法在实际工程应用中还差强人意。如何通过实际应用系统获取训练集和测试集,从而提升深度学习网络在实际工程应用中的超分辨率重建效果是未来的一个努力方向。此外,随着计算成像理论和技术的发展,采用计算成像技术实现超分辨率偏振成像也是一个未来发展方向^[35]。

5 总结

偏振成像是一种新的光电探测体制,它可以获得比传统成像多一维的信息。虽然该技术在工业视觉领域还没有得到广泛应用,但学术界已经对相关理论和技术进行了较深入的研究和探索。前期的研究成果表明,相对于传统成像,偏振成像技术在工业视觉领域具有更好的应用前景,相信随着分焦平面偏振信息获取、非均匀性校正及偏振成像超分辨率重建等关键技术的突破,偏振成像技术必将在工业视觉领域得到推广应

用,展现出其应有的价值。此外,作为一种无标记、无损伤的光学检测技术,偏振光学成像技术在病理诊断领域也展现出了良好的应用效果。如文献[44]介绍了几种以商业显微镜为基础的模块化穆勒矩阵显微镜,对其光路结构、测量原理、校准方法进行了详细的阐述,并展示了其对活体组织和细胞的成像结果。

参 考 文 献

- [1] 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.
- [2] Homma K, Shingu H, Yamamoto H, et al. Application of an imaging spectropolarimeter to agro-environmental sciences[J]. *Proceedings of SPIE*, 2004, 5234: 638-647.
- [3] Beekman D W, van Anda J. Polarization sensitive QWIP thermal imager[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2001, 42(3/4/5): 323-328.
- [4] Antoni T, Nedelcu A, Marcadet X, et al. High contrast polarization sensitive quantum well infrared photodetectors [J]. *Applied Physics Letters*, 2007, 90(20): 201107.
- [5] Kudenov M W, Escuti M J, Dereniak E L, et al. White-light channeled imaging polarimeter using broadband polarization gratings[J]. *Applied Optics*, 2011, 50(15): 2283-2293.
- [6] Brock N, Kimbrough B T, Millerd J E. A pixelated micropolarizer-based camera for instantaneous interferometric measurements[J]. *Proceedings of SPIE*, 2011, 8160: 81600W.
- [7] Zhang W F, Liang J, Ren L Y, et al. Real-time image haze removal using an aperture-division polarimetric camera[J]. *Applied Optics*, 2017, 56(4): 942-947.
- [8] 赵永强, 李宁, 张鹏, 等. 红外偏振感知与智能处理[J]. *红外与激光工程*, 2018, 47(11): 1102001.
Zhao Y Q, Li N, Zhang P, et al. Infrared polarization perception and intelligent processing[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(11): 1102001.
- [9] Rebhan D, Rosenberger M, Notni G. Principle investigations on polarization image sensors[J]. *Proceedings of SPIE*, 2019, 11144: 111440A.
- [10] 李雪, 邵秀梅, 李淘, 等. 短波红外 InGaAs 焦平面探测器研究进展[J]. *红外与激光工程*, 2020, 49(1): 0103006.
Li X, Shao X M, Li T, et al. Developments of short-wave infrared InGaAs focal plane detectors[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(1): 0103006.
- [11] Garcia M, Edmiston C, Marinov R, et al. Bio-inspired color-polarization imager for real-time *in situ* imaging[J]. *Optica*, 2017, 4(10): 1263-1271.
- [12] Garcia M, Davis T, Blair S, et al. Bioinspired polarization imager with high dynamic range[J]. *Optica*, 2018, 5(10): 1240-1246.
- [13] 胡玮娜, 吕勇, 耿蕊, 等. 光电探测器表面损伤状态偏振成像式探测系统[J/OL]. *红外与激光工程*: 1-15[2021-05-07]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1261.TN.20211105.1439.007.html>.
Hu W N, Lü Y, Geng R, et al. Photoelectric detector surface damage state polarization imaging type detection system[J/OL]. *Infrared and Laser Engineering*: 1-15 [2021-05-07]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1261.TN.20211105.1439.007.html>.
- [14] 熊志航, 廖然, 曾亚光, 等. 利用偏振成像在复杂现场快速识别金属碎屑(特约)[J]. *红外与激光工程*, 2020, 49(6): 20201012.
Xiong Z H, Liao R, Zeng Y G, et al. Rapid identification of metal debris in complicated scenes by using polarization imaging(Invited)[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(6): 20201012.
- [15] 汪方斌, 孙凡, 朱达荣, 等. 一种基于偏振热像的金属疲劳损伤评估方法[J]. *光学学报*, 2020, 40(14): 1412002.
Wang F B, Sun F, Zhu D R, et al. Metal fatigue damage assessment based on polarized thermography[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(14): 1412002.
- [16] 朱达荣, 杨善骥, 汪方斌, 等. 疲劳损伤过程金属表面偏振热像纹理特征实验研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2022, 59(4): 0424001.
Zhu D R, Yang S J, Wang F B, et al. Texture characteristics of polarized thermal images on metal surfaces in fatigue damage process[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2022, 59(4): 0424001.
- [17] 汪靓, 杨宇, 黄敏, 等. 基于偏振成像技术的油桃机械损伤检测[J/OL]. *激光技术*: 1-15[2022-03-30]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1125.TN.20211214.1009.002.html>.
Wang L, Yang Y, Huang M, et al. Mechanical bruise detection of nectarine based on polarization imaging technology[J/OL]. *Laser Technology*: 1-15[2022-03-30]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1125.TN.20211214.1009.002.html>.
- [18] Sarkar M, San Segundo Bello D S S, van Hoof C, et al. Integrated polarization analyzing CMOS image sensor for material classification[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2011, 11(8): 1692-1703.
- [19] Hosoya N, Umino R, Kajiwara I, et al. Damage detection in transparent materials using non-contact laser excitation by nano-second laser ablation and high-speed polarization-imaging camera[J]. *Experimental Mechanics*, 2016, 56(2): 339-343.
- [20] 李轩, 刘飞, 邵晓鹏. 偏振三维成像技术的原理和研究进展[J]. *红外与毫米波学报*, 2021, 40(2): 248-262.
Li X, Liu F, Shao X P. Research progress on polarization 3D imaging technology[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2021, 40(2): 248-262.
- [21] Atkinson G A, Hancock E R. Recovery of surface orientation from diffuse polarization[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2006, 15(6): 1653-1664.
- [22] Wolff L B, Boulton T E. Constraining object features using a polarization reflectance model[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1991, 13(7): 635-657.
- [23] Sato Y, Wheeler M D, Ikeuchi K. Object shape and reflectance modeling from observation[C]//*Proceedings of the 24th Annual Conference on Computer Graphics*

- and Interactive Techniques, August 3-8, 1997, Los Angeles, CA, USA. New York: ACM Press, 1997: 379-387.
- [24] 张景华, 张焱, 石志广, 等. 基于法向量估计的透明物体表面反射光分离[J]. 光学学报, 2021, 41(15): 1526001.
Zhang J H, Zhang Y, Shi Z G, et al. Reflected light separation on transparent object surface based on normal vector estimation[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(15): 1526001.
- [25] 黄盛志. 单目偏振三维成像技术研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2019.
Huang S Z. Research on monocular polarization 3D imaging technology[D]. Xi'an: Xidian University, 2019.
- [26] Drouet F, Stolz C, Lalignat O, et al. 3D measurement of both front and back surfaces of transparent objects by polarization imaging[J]. Proceedings of SPIE, 2014, 9205: 92050N.
- [27] Sun Z, Qiao Y, Jiang Z G, et al. An accurate Fourier-based method for three-dimensional reconstruction of transparent surfaces in the shape-from-polarization method[J]. IEEE Access, 2020, 8: 42097-42110.
- [28] Han P L, Cai Y D, Liu F, et al. Computational polarization 3D: new solution for monocular shape recovery in natural conditions[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2022, 151: 106925.
- [29] Tian X, Liu R, Wang Z Y, et al. High quality 3D reconstruction based on fusion of polarization imaging and binocular stereo vision[J]. Information Fusion, 2022, 77: 19-28.
- [30] Zuo C, Feng S J, Huang L, et al. Phase shifting algorithms for fringe projection profilometry: a review[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2018, 109: 23-59.
- [31] Su X Y, Zhang Q C. Dynamic 3-D shape measurement method: a review[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2010, 48(2): 191-204.
- [32] Qian K M. Two-dimensional windowed Fourier transform for fringe pattern analysis: principles, applications and implementations[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2007, 45(2): 304-317.
- [33] 张俊超. 分焦平面偏振成像关键技术研究[D]. 沈阳: 中国科学院沈阳自动化研究所, 2019.
Zhang J C. Research on key techniques of polarization imaging for division-of-focal-plane polarimeters[D]. Shenyang: Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, 2019.
- [34] Tian X B, Tu X Z, Zhang J C, et al. Snapshot multi-wavelength interference microscope[J]. Optics Express, 2018, 26(14): 18279-18291.
- [35] 罗海波, 张俊超, 盖兴琴, 等. 偏振成像技术的发展现状与展望(特邀)[J]. 红外与激光工程, 2022, 51(1): 20210987.
Luo H B, Zhang J C, Gai X Q, et al. Development status and prospects of polarization imaging technology (Invited)[J]. Infrared and Laser Engineering, 2022, 51(1): 20210987.
- [36] Li N, Zhao Y Q, Pan Q, et al. Demosaicking DoFP images using Newton's polynomial interpolation and polarization difference model[J]. Optics Express, 2019, 27(2): 1376-1391.
- [37] Wu R Y, Zhao Y Q, Li N, et al. Polarization image demosaicking using polarization channel difference prior[J]. Optics Express, 2021, 29(14): 22066-22079.
- [38] Zhang J C, Luo H B, Liang R G, et al. Sparse representation-based demosaicking method for microgrid polarimeter imagery[J]. Optics Letters, 2018, 43(14): 3265-3268.
- [39] 张俊超, 陈溅来, 罗海波, 等. 基于张量非负稀疏分解的偏振图像插值算法[J]. 光学学报, 2021, 41(14): 1411001.
Zhang J C, Chen J L, Luo H B, et al. Polarization image interpolation algorithm via tensor non-negative sparse factorization[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(14): 1411001.
- [40] Zhang J C, Shao J B, Luo H B, et al. Learning a convolutional demosaicking network for microgrid polarimeter imagery[J]. Optics Letters, 2018, 43(18): 4534-4537.
- [41] Zeng X L, Luo Y, Zhao X J, et al. An end-to-end fully-convolutional neural network for division of focal plane sensors to reconstruct S_0 , DoLP, and AoP[J]. Optics Express, 2019, 27(6): 8566-8577.
- [42] Wen S J, Zheng Y Q, Lu F, et al. Convolutional demosaicking network for joint chromatic and polarimetric imagery[J]. Optics Letters, 2019, 44(22): 5646-5649.
- [43] Hu H F, Lin Y, Li X B, et al. IPLNet: a neural network for intensity-polarization imaging in low light[J]. Optics Letters, 2020, 45(22): 6162-6165.
- [44] 黄彤宇, 孟若愚, 赵千皓, 等. 模块化全偏振显微镜[J]. 中国激光, 2021, 48(15): 1517002.
Huang T Y, Meng R Y, Zhao Q H, et al. Modular full-polarization microscope[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(15): 1517002.