中国科学:信息科学 2024年 第54卷 第7期:1620-1645

SCIENTIA SINICA Informationis

评述



偏振视觉

赵永强1*,乔新博1,李宁2,潘泉1

1. 西北工业大学自动化学院, 西安 710072

2. 清华大学自动化系, 北京 100084

* 通信作者. E-mail: zhaoyq@nwpu.edu.cn

收稿日期: 2023-05-31; 修回日期: 2023-09-06; 接受日期: 2023-10-23; 网络出版日期: 2024-07-09

国家自然科学基金 (批准号: 61771391)、陕西省重点研发计划 (批准号: 2020ZDLGY07-11)、深圳市科技创新委员会基础研究 (学 科布局) (批准号: JCYJ20170815162956949)、深圳市科技创新委员会基础研究 (自由探索) (批准号: JCYJ20180306171146740) 和中央高校基础研究基金资助

摘要 传统视觉技术已经广泛应用于生产生活中的各类领域,然而在面对复杂环境以及非合作目标 时,获得的信息量有限使传统视觉技术无法有效地检测、识别目标.作为与光强、波长、相位并列的光 的基本物理特性,偏振能够反映发射或反射光的振动特性,表征物体的多种信息,因此偏振信息能有 效区分目标与背景,并在恶劣环境中维持信息有效性.利用偏振信息的这种特性,人们将光的偏振信 息引入视觉系统,得到了一种解决复杂场景成像问题的方案,即偏振视觉.偏振视觉最早在部分生物 上发现,对偏振视觉的进一步研究使人们发现偏振视觉相较于传统视觉在复杂场景下的成像优势.本 文以偏振视觉的发展为主线整理了偏振视觉技术的诞生、成像设备的发展与该技术在各领域的应用, 并展望了偏振视觉及其相关技术的未来发展方向.

关键词 偏振视觉,偏振信息,偏振成像设备,散射介质成像,目标检测,反射光去除,三维重构

1 引言

传统视觉技术经过长期发展,已经广泛应用于人们的日常生活与工业生产、医学成像、交通管制、 军事侦察等领域.然而,在面对各种复杂场景如雨雪、雾霾、扬沙等复杂天气,烟雾、水下等散射介质, 或面对伪装目标、透明物体等非合作目标时,基于传统视觉技术获取的图像与视频质量将大幅下降, 对图像、视频的后续处理、分析也将受到严重的影响.

偏振作为光的重要物理特性之一,能够反映发射或反射光的振动特性,表征物体表面的理化性质如材质、表面光滑度、纹理、形状等^[1],因此即使是在恶劣天气、散射介质等复杂环境影响下,包含物体表面理化特性的偏振信息也能够有效辨识场景中的非合作目标^[2].1949年,生物学家 Karl von Frisch 发现蜜蜂能够感知偏振光,自此人们发现部分生物具有偏振视觉,能够获取环境中的偏振信息协助自身生存.然而传统视觉技术只能获取光的强度信息与光谱信息,无法获取其偏振信息.为获取

引用格式: 赵永强, 乔新博, 李宁, 等. 偏振视觉. 中国科学: 信息科学, 2024, 54: 1620–1645, doi: 10.1360/SSI-2023-0160 Zhao Y Q, Qiao X B, Li N, et al. Polarization vision (in Chinese). Sci Sin Inform, 2024, 54: 1620–1645, doi: 10.1360/ SSI-2023-0160

ⓒ 2024《中国科学》杂志社



图 1 (网络版彩图) 溯源风闲与历土子 Figure 1 (Color online) Polarization vision's biological origion

光的偏振信息,人们模仿生物偏振视觉,构建了能在可见光或红外等波段下获取物体偏振信息的偏振 成像系统,由于对偏振光的物理特性研究远早于对偏振成像的研究,因此在仿生学与物理学的相应理 论指导下偏振视觉技术得到了快速的发展.随着技术的发展与完善,现在的偏振成像系统不仅具有较 小的体积与较低的功耗,并且能实时获取准确的偏振图像^[3].由于偏振信息能够抵抗介质散射、恶劣 天气、照度不足、目标伪装等干扰^[2],因此偏振视觉在散射介质清晰成像、目标检测、三维成像等诸多 领域得到了广泛的应用,并在偏振导航、镜面反射去除等诸多领域等仍有较大的应用前景与发展空间.

本文回顾了偏振视觉技术的发展,从偏振视觉的仿生学来源入手,对偏振成像机理与相关参数进行了介绍与说明.接下来本文整理了偏振成像系统的发展历程,对偏振视觉的代表性应用进行了介绍, 并展望了偏振视觉未来的发展与应用.

2 偏振视觉的发展

2.1 偏振成像与仿生学

在自然界,许多生物进化出偏振视觉以提高视觉能力 (图 1). 1949 年, Frisch^[4] 在研究蜜蜂的"舞蹈"时发现利用偏光镜可以改变蜜蜂的飞行方向,使人们第 1 次认识到生物能够感知偏振光. 后人对 蜜蜂等昆虫的导航能力进行研究时发现它们能够利用天空偏振信息协助自身的定位与导航^[5]. 此后, 越来越多的研究表明许多动物都有偏振视觉,提高复杂环境下的视觉能力或作为辅助信息进行定位与 导航. 这些生物主要包括部分昆虫、鸟类、爬行类、两栖类、大部分虾姑科、头足类生物以及极少量的 哺乳类生物^[6~8]. 通过对这些动物的偏振视觉能力与偏振视觉优势进行研究,提高了人们对偏振成像 的认识,为偏振成像系统的发展与研究提供了有力的帮助.

2.1.1 生物偏振视觉机理

由于进化过程的巨大差异,无脊椎动物与有脊椎动物用于感知偏振光的视觉系统具有完全不同的 结构.具有偏振视觉的无脊椎动物种类繁多,包括陆地上的昆虫^[5]、水下的口足类生物^[9]、头足类生 物^[10]等.然而不论是陆地上的昆虫还是水下的螳螂虾、乌贼,其视觉系统中用于获取偏振信息的部 分具有相同的机理:在生长过程中这些动物的视觉系统内分化出两类特化横纹肌感光细胞,其中一类 细胞由相互平行并垂直于细胞光轴的微绒毛管堆叠而成,这种类似偏光片的结构使这些特化感光细胞 产生了固有二色性,对线偏振光具有敏感性^[11,12](参考文献 [7]中的图 7.7),而另一类由垂直于细胞 光轴且相互垂直的微绒毛管堆叠而成,对圆偏振光具有敏感性^[7].不同的无脊椎动物对偏振光的感知 水平有着显著区别.例如大部分昆虫仅有复眼背部的"背缘"区域具有偏振光感知能力而少数昆虫如 飞蛾、咬蝇等具有全局偏振视觉^[13,14];水下的口足类动物如螳螂虾的眼部进化出了"中带"以获取颜 色信息与偏振信息作为视觉信号^[15];而无法获取颜色信息的头足类动物如章鱼等进化出了精确的全 局偏振视觉以适应复杂的水下环境^[10].

在对无脊椎动物的偏振视觉研究了近 40 年后,人们逐渐发现一些类别的脊椎动物如鱼类、两栖 类、鸟类生物也具有全局偏振视觉^[7].与无脊椎动物不同,脊椎动物的感光细胞不是由微绒毛管堆叠 而成,因此无法形成类似偏光片的结构以获取固有二色性.脊椎动物利用双锥细胞的内部反射、细胞 膜表面脂质方向与细胞内色素分子的排列顺序使横向排列于视网膜上的细胞产生偏振光敏感性以感 知偏振信息^[7,16] (参考文献 [7] 中的图 9.3).对生物偏振视觉半个多世纪的研究使人们对生物感知偏 振光的生理结构与偏振敏感性的形成原因有了充分的认识与理解,而对生物偏振视觉的机理研究将更 好地协助人们构建偏振成像系统,完善相关理论并指导后续的发展方向.

2.1.2 生物偏振视觉功能

利用天空偏振信息导航具有不受天气限制、准确度较高等优势,因此大部分具有偏振视觉或能够 感知偏振光的生物都具有偏振导航能力^[7].在认识到生物具有偏振视觉前,人们已经通过研究发现 部分生物如蚂蚁可以利用头顶的天空进行导航而无需观测太阳位置^[7].此后随着对生物偏振视觉的 研究发现许多种类的昆虫能够感知偏振光或存在偏振视觉,并利用偏振信息导航、定位或校准前进方 向^[17,18].作为脊椎动物,鸟类相比昆虫具有更多导航手段如天梯罗盘、太阳罗盘、地磁罗盘等,尽管如 此,许多鸟类仍旧会利用偏振视觉协助导航或在黎明与黄昏时利用偏振信息校准其他导航罗盘^[19,20]. 尽管与大气环境存在较大区别,水下仍有部分生物如螃蟹、乌贼与部分鱼类^[7,21]能利用偏振视觉进 行导航定位,利用水下光的偏振模式确定太阳的航向、仰角与太阳方位,即可得到较为准确的定位 结果^[22].

在环境复杂的水下,受介质散射与介质吸收影响较小的偏振信息相比受散射影响较大的颜色信息 与光强信息能在躲避天敌、搜寻猎物等方面为生物提供更显著的生存优势.在视野开阔、缺少可躲藏 空间的开放海域,大量被捕食者会采取将自身透明化或反射阳光的方法隐蔽自身^[23,24].为应对这两 类伪装,以透明生物为食的捕食者会利用偏振视觉识别具有显著偏振态的肌肉等组织结构^[25],大幅降 低目标在视场中的透明度^[26],提高捕猎成功率;而以反射光伪装生物为食的捕食者则会利用反射光为 部分偏振光的特性,将目标从无偏的阳光与水面耀光中分离^[27,28].而即使不以这两类生物为食,受介 质散射影响较小的偏振信息也能够提升视场距离,改善浑浊水体中的视觉效果,躲避逼近的捕食者或 提升对猎物的定位距离^[29,30],进而提高这些水下生物的生存几率. 常年栖息于海底的头足类生物与口足类生物具有较为精确的偏振视觉能力,除了协助导航、狩猎与躲避天敌外,这些生物还能利用偏振信息进行交流,在不向天敌暴露自己位置的同时完成种内的信息交换^[31~33].螳螂虾、龙虾等口足类生物会利用色素分子、身体上的特定结构或囊泡散射等方式在体表发出线偏振或圆偏振信息以实现基于偏振信息的交流,而章鱼、乌贼、鱿鱼等头足类生物可以利用皮肤中的特殊反射细胞反射的光构建偏振信号^[34],使其能够在保持自身伪装的同时进行沟通与交流^[35].尽管目前人们仍旧无法理解这些偏振信息的具体含义,但大量的研究证实这几类生物能利用偏振信息有效地维持种内信息交流,提升整个族群的生存几率.

2.2 偏振成像机理与常用偏振参数

偏振成像的目的是对场景不同空间位置入射光的偏振状态进行解算并成像,光的偏振状态通常采 用斯托克斯 (Stokes) 矢量 ^[2] 来表示,即 $S = [S_0, S_1, S_2, S_3]^T$.其中第 1 个斯托克斯参量 S_0 表示光 的总强度, S_1 表示水平或垂直方向的线偏振能量, S_2 表示 +45° 或 -45° 方向线偏振能量, S_3 表示 左旋或右旋圆偏振分量.现有成熟的光学成像探测器,包括传统的灰度相机与光谱相机都是基于对入 射光强度的直接测量或调制测量来实现对入射光的强度信息或频谱信息进行成像.由斯托克斯公式 $I(\theta, \phi) = \frac{1}{2} [S_0 + S_1 \cos 2\theta + S_2 \cos \phi \sin 2\theta + S_3 \sin \phi \sin 2\theta]$ 可知,将相位延迟器的相位延迟 ϕ 调节到 0° 并 将线偏振片设置到不同方向 θ ,即可解算出前 3 个斯托克斯矢量,而第 4 个斯托克斯矢量则需要将相 位延迟器 ϕ 调节到 90°,并将 θ 调节到 45° 求得 ^[36]:

$$I(0^{\circ}, 0^{\circ}) = \frac{1}{2} [S_0 + S_1],$$

$$I(45^{\circ}, 0^{\circ}) = \frac{1}{2} [S_0 + S_2],$$

$$I(90^{\circ}, 0^{\circ}) = \frac{1}{2} [S_0 - S_1],$$

$$I(45^{\circ}, 90^{\circ}) = \frac{1}{2} [S_0 + S_3].$$

(1)

之后由式(1)解算即可得到斯托克斯参量

$$S_{0} = I(0^{\circ}, 0^{\circ}) + I(90^{\circ}, 0^{\circ}),$$

$$S_{1} = I(0^{\circ}, 0^{\circ}) - I(90^{\circ}, 0^{\circ}),$$

$$S_{2} = 2I(45^{\circ}, 0^{\circ}) - I(0^{\circ}, 0^{\circ}) - I(90^{\circ}, 0^{\circ}),$$

$$S_{3} = 2I(45^{\circ}, 90^{\circ}) - I(0^{\circ}, 0^{\circ}) - I(90^{\circ}, 0^{\circ}).$$
(2)

利用得到的斯托克斯参量可以进一步计算入射光的两个主要偏振参量,即偏振度 (degree of polarization, DoP) 与偏振角 (angle of polarization, AoP):

$$DoP = \frac{\sqrt{S_1^2 + S_2^2 + S_3^2}}{S_0},$$
(3)

$$AoP = \frac{1}{2}\arctan\left(\frac{S_2}{S_1}\right).$$
(4)

2.3 偏振成像系统的发展

2.3.1 传统偏振成像系统

偏振成像的基本原理决定了偏振成像系统需要采集入射光经不同状态偏振光学元件(偏振片、相





Figure 2 (Color online) Traditional polarization imaging method. (a) Division of time; (b) division of amplitude; (c) division of aperture

位延迟器)调制后的图像,传统的偏振成像系统主要包括分时偏振成像系统、分振幅偏振成像系统以 及分孔径偏振成像系统.

根据偏振成像的机理,最直观的偏振成像方式便是机械旋转线偏振片,然后采集偏振片在不同方向时的图像,这种偏振成像方式称为分时偏振成像系统 (图 2(a))^[1].只采用线偏振片的分时偏振成像系统只能得到场景的线偏振信息,同时配合使用相位延迟器即可实现全偏振成像.分时偏振成像系统结构简单,成本低廉,是早期偏振成像的主要方式.但由于需要机械旋转偏振片,分时偏振成像系统只能对静态场景成像,无法获取动态场景的偏振信息,这也是分时偏振成像系统的主要缺点.但是分时偏振成像系统简单的结构也让其在可见光与红外等波段有着广泛的应用.使用高速电机旋转偏振片的分时偏振成像系统可以用于准静止场景或低速运动目标.另外,使用电调谐偏振装置 (例如液晶可调谐相位延迟器及声光可调谐滤波器等)可以减少传统分时系统中转轮的机械振动,但仍只能应用于静态场景偏振成像.

分振幅偏振成像系统 (图 2(b))^[37~39] 将入射光通过多个分束镜分为多束光, 配合偏振片或者相 位延迟器, 然后采用多个焦平面阵列对每束光进行成像, 从而实现偏振成像. 显然, 分振幅偏振成像系 统可以对动态场景进行偏振成像, 但其缺点也很明显, 由于需要使用多个焦平面探测器, 分振幅偏振 成像系统的体积重量较大, 成本也更高, 而且需要确保高精度的机械装配以保证各焦平面探测器采集 图像的空间配准. 偏振分束镜是分振幅偏振成像系统中最常用也是最基础的分束装置, 根据不同的偏 振成像需求, 可以使用单个或多个偏振分束镜的不同组合实现线偏振或全偏振成像.

图 2(c) 所示为分孔径偏振成像系统^[1],这种偏振成像系统采用重成像光学设计将入射光投影到 焦平面阵列探测器的 4 个等分区域,即将一幅图像拆分成 4 幅分辨率减半的子图,通过在每个重投影 光路上设置不同方向的偏振片或相位延迟器便可实现线偏振或全偏振成像.相比分振幅偏振成像,分 孔径偏振成像系统采用单个焦平面探测器便可实现实时的偏振成像,但牺牲了图像的空间分辨率,同 时需要复杂的重成像光学设计.

2.3.2 分焦平面偏振成像系统

随着微纳加工工艺的成熟,分焦平面偏振成像技术^[40]作为新一代仿生偏振成像技术近年来被广 泛关注.分焦平面 (division-of-focal-plane, DoFP)偏振成像技术 (图 3)采用以空间换时间的思想,牺 牲一部分空间分辨率,以类似于彩色滤波阵列^[41]的方式在焦平面阵列表面直接集成像素级微偏振片 阵列,实现不同方向偏振信息的实时采集.目前分焦平面偏振成像主要为线偏振成像,且主要采用亚 波长金属光栅来制备像元级线偏振片^[42],亚波长金属光栅结构简单、易制备,光栅结构尺寸主要在纳



图 3 (网络版彩图) 分焦平面偏振成像技术示意图

Figure 3 (Color online) Division-of-focal-plane imaging method

表 1 不同偏振成像方式特点

Table 1 Comparation of different polarization in	maging methods
--	----------------

Polarization imaging	Advantage	Disadvantago	Difficulty of
method	Auvantage	Disadvantage	implementation
Division of time imaging	Low structural complexity Small volume Inexpensive	Unsuitable for real-time imaging Susceptible to mechanical vibration	Easy
Division of amplitude imaging	Real-time imaging	Bulky Expensive Need massive calibrate accurately	Normal
Division of aperture imaging	Real-time imaging Small volume	Low resolution Complex structure Expensive	Hard
Division of focal plane imaging	Real-time imaging Small volume High integration density	Instantaneous field-of-view error Expensive (the cost reduced by manufacture's development)	Very hard (difficulty reduced by manufacture's development)

米级,而目前的探测器像元 (包括可见光与红外探测器) 尺寸主要在微米级,即使在有限尺寸的像元内 也可制备足够数量的金属光栅,从而实现有效的像元级偏振片制备.目前分焦平面偏振成像探测器已 经覆盖从可见光^[43] 到长波红外^[44,45] 多个波段,具有体积小、重量轻、集成度高、可实时成像等优 势,是小型化偏振成像的趋势,也逐渐成为偏振成像的主流方式,因此分焦平面偏振成像系统的诞生有 效促进了偏振视觉的快速发展.为便于对比,表 1 中总结了不同偏振成像系统的优缺点以及工程实现 难度.

2.3.3 偏振成像系统未来发展趋势

长远来看,未来偏振成像技术将朝着全偏振、高分辨率、复合化、智能化的集成式偏振探测的方向发展.

全偏振. 分焦平面偏振成像已是集成度很高的偏振成像技术, 但是目前的分焦平面偏振成像技术 主要为线偏振成像, 还不具备全偏振成像能力, 且牺牲了一定的空间分辨率. 所以未来偏振成像的一大 趋势便是全偏振成像 (即全斯托克斯成像), 尤其在主动式偏振成像中具有更大的潜力. 超表面技术的 出现使实时、集成式全偏振成像成为可能, 目前已出现相关设计, 如文献 [46] 中提出的像素级全电介质 Si-SiO₂-Si 三层超表面 (参考文献 [46] 中的图 1(a)), 文献 [47] 在硅基表面制备银金属超表面, 以及文 献 [48] 提出的双层十字超表面 – 一维光栅的复合结构, 均可实现像元级的全偏振调制. 另外*Science*^[49] 在 2019 年报道了一种基于矩阵傅里叶 (Fourier) 光学的超表面衍射光栅全偏振成像技术 (参考文献 [49] 中的图 3(a)), 具备实时、集成化全偏振成像能力. 但以上方法均不可避免地牺牲了空间分辨率, 来实 现多次偏振调制测量.

高分辨率. Science 在 2018 年报道了纳米尺度偏振探测器的研究工作 ^[50], 研究表明一些纳米结构 的响应与入射光的偏振态具有紧密的关联. 文献 [51] 基于光的"自旋 – 轨道"相互作用, 提出了一种 亚波长散射体与多模波导的耦合结构, 通过对该结构不同端口输出信号的测量解算便可实现全斯托克 斯偏振探测, 这样只需单一纳米结构便可实现全斯托克斯偏振探测, 无需牺牲空间分辨率进行不同方 向偏振片的排布 (参考文献 [51] 中的图 1(b)). 文献 [52] 也提出了一种二维介质光栅结构, 同样可以实 现基于单一结构的全斯通克斯偏振探测. 虽然这些方法目前仍处于原理性设计验证阶段, 但这些新型 纳米结构均具有阵列化与片上集成的能力, 搭配定制化设计的读出电路, 有望成为下一代高集成、高 分辨率、全斯托克斯偏振成像探测器 (参考文献 [52] 中的图 1).

复合化. 偏振只是光的基本特性之一, 目前, 单一信源已无法满足光学遥感、成像探测、计算机 视觉等日益增长的需求, 复合化的成像芯片将成为更具潜力的发展方向. 索尼在推出单色偏振 CMOS 后, 又进一步推出了彩色偏振 CMOS, 通过单片集成彩色滤光片与偏振滤光片, 实现场景偏振与彩色 信息的同时获取. 所以未来也有望进一步出现多光谱偏振焦平面阵列. 另外, 目前也逐渐出现了利用 偏振成像来复合增强其他成像技术的研究. 例如, 将偏振成像与事件相机结合可以得到高动态范围与 高事件分辨率的偏振信息^[53], 有望发现一些瞬变的偏振现象; Jeon 等^[54] 利用偏振成像成功提升了间 接光飞行时间法 (indirect time-of-flight, iToF) 在散射介质 (如雾霾) 中深度测量的精度 (参考文献 [54] 中的图 3). 未来将偏振成像与其他成像技术结合有望发展出更多功能更加丰富强大的成像探测手段.

智能化. 耶鲁大学 (Yale University) 等^[55] 近期在*Science* 发文提出了几何深度光学感知的概念, 即利用可重构成像芯片对入射光进行编码,再利用深度神经网络进行解码,从而直接从未知入射光中 破译丰富的信息,包括光强、偏振、光谱、空间特征等信息 (参考文献 [55] 中的 outlook). 例如,分焦 平面偏振成像探测器本质上也是一种可重构成像芯片. 一方面,先进的深度神经网络将使高维光响应 向量的有效解码成为可能,这将降低传感器的物理复杂性. 另一方面,基于神经网络的模拟计算可以 通过可重构器件阵列进行,从而实现传感和计算功能的直接复用. 此外,深度传感方案将继续受益于 机器学习的最新发展. 未来高度紧凑、多功能、可重构和智能化的成像芯片将在光学遥感、机器视觉、 医疗成像、环境监测、天文观测和我们日常生活的许多其他领域得到应用.

3 偏振视觉典型应用场景

3.1 散射介质清晰成像

乌贼等水下生物能够利用偏振视觉减弱介质中光的散射、吸收对成像效果的影响,受这类生物启发,人们利用偏振视觉对介质散射的不敏感性将偏振成像技术应用于水下成像.由于偏振成像系统具有结构简单、性能优异、性价比高等特点^[56],使其在水下图像增强领域得到了广泛的应用.基于偏振视觉的水下图像增强方法会利用散射光的偏振特性将背景的散射光与目标发射、反射的光进行分离,

1626



图 4 (网络版彩图) 散射介质成像模型 Figure 4 (Color online) Scattering medium imaging



图 5 (网络版彩图) 散射介质清晰成像效果 Figure 5 (Color online) Scattering medium imaging result

从而获取清晰的目标图像.即使水体较为浑浊,利用偏振度等信息仍旧能够对水下的散射光进行准确的估计,提高目标与背景的对比度^[57,58],并能将目标检测距离提升 2~3 倍^[59],这与仿生学研究中水下生物能利用偏振视觉将可视距离提高 2 倍的实验结果相吻合.由于人造物体相比自然物具有更强的偏振特性,因此偏振视觉在检测水下人造物体时也具有良好的性能^[60].偏振视觉在散射介质中的这种优越性在图像去雾中同样有所体现.与水下图像类似,雾天由于大气的吸收、散射效应加剧导致场景能见度大幅降低 (图 4),然而更低的吸收率与散射率使基于偏振成像的图像去雾过程能直接利用成像物理模型、大气条件等模型进行图像恢复,从而获取更准确的图像^[61],并以恢复的图像为基础进行场景分割或目标检测^[62] (图 5).

由于散射介质中悬浮粒子的吸收和散射作用, 传统光学成像的对比度降低, 颜色退化, 严重影响后续应用. Jaffe-McGlamery^[63]模型已被广泛用于表征散射介质中成像的退化过程. 散射介质成像由前向散射、后向散射和直接透射光线性叠加组成. 在实际情况中, 前向散射效应可以忽略不计. 成像模型可以简化为

$$I(x,y) = J(x,y)t(x,y) + B_{\infty}(x,y) \left(1 - t(x,y)\right),$$
(5)

Scattering medium	Polarimetric imaging	Imaging based on	Imaging based on	Imaging based on
imaging method	method	Stokes parameters	Mueller matrix	deep learning
Characteristic	Construct connections among scattering medium, polarization information and imaging based on the polarization effect of scattering medium imaging	Analyze the incident light based on the Stokes vector, DoP and AoP	By decoupling the propagation process of scattering medium based on the Mueller matrix	Construct the descattering image based on the deep-learning network
Advantage	Low complexity	Obtain a better result with a single image	Can separate the object and medium with different polarization characteristics	Obtain a much better result with high accuracy
Disadvantage	Obtain a less effective result and rely on prior information	Less effective result caused by low complexity	High demand for images caused by high complexity	Lack an effective and generalized dataset

表 2 散射介质清晰成像方法

 Table 2
 Scattering medium imaging methods

其中 I(x,y) 表示成像设备在像素 (x,y) 处的强度值. J 表示场景的环境光照,即待恢复的图像. B_{∞} 是无穷远场景的强度. t 是传输图,描述了退化后到达成像设备的场景辐射的比例. J(x,y), t(x,y) 和 $B_{\infty}(1 - t(x,y))$ 分别表示直接透射和后向散射. 传输图 t(x,y) 与从相机到目标的距离以及粒子浓度 相关:

$$t(x,y) = e^{-\beta z(x,y)},\tag{6}$$

其中 β 称为衰减系数,反映散射介质的浑浊程度. z(x,y) 表示每个像素点到成像设备的空间距离.如 果 B_{∞} 和 t 已知,恢复图像 J 可以计算为

$$J(x,y) = \frac{I(x,y) - B_{\infty}(x,y) \left(1 - t(x,y)\right)}{t(x,y)}.$$
(7)

典型的散射介质偏振成像包括偏振差分成像、基于 Stokes 的偏振成像、基于穆勒 (Mueller) 矩阵成像与基于深度学习的系统^[64,65].本小节将介绍这 4 种成像方式在散射介质中成像的基本原理以及 代表性的方法 (表 2).

3.1.1 基于偏振差分成像的方法

偏振差分成像只需要获取两张偏振图像,具有易于操作、复杂度低的特点.偏振差分成像的方法 最先由 Schechner 等^[66,67]提出,其考虑了通过散射介质 (例如水下、雾霾) 成像时发生的自然偏振效 应,并建立了大气特性、偏振特性和成像形式之间的关系.该方法捕获两个正交偏振图像,每个图像由 两个分量 (直接透射和后向散射)组成.由于后向散射通常是部分偏振的,因此这两幅图像可以用以下 方式描述:

$$I^{\parallel}(x,y) = \frac{D(x,y)}{2} + B^{\parallel}(x,y)I^{\perp}(x,y) = \frac{D(x,y)}{2} + B^{\perp}(x,y).$$
(8)

结合式 (5) 和 (8), 后向散射和透射图可以通过以下方式计算:

$$B(x,y) = \frac{I^{\parallel}(x,y) - I^{\perp}(x,y)}{\text{DoP}_{B}(x,y)},$$
(9)

$$t(x,y) = 1 - \frac{B(x,y)}{B_{\infty}(x,y)} = 1 - \frac{I^{\parallel}(x,y) - I^{\perp}(x,y)}{\text{DoP}_{B}(x,y)B_{\infty}(x,y)},$$
(10)

其中 DoP_B 表示后向散射区域的线性偏振度, 定义为

$$DoP_B(x,y) = \frac{B^{//}(x,y) - B^{\perp}(x,y)}{B^{//}(x,y) + B^{\perp}(x,y)},$$
(11)

1628

这里 B_{∞} 和 DoP_B 依赖于后向散射区域的选择,这极其依赖于先验知识. 一旦后向散射区域确定, B_{∞} 和 DoP_B 成为全局常数.

经过长期的发展,目前已经有大量成熟的基于偏振差分的散射介质成像方法,如利用独立成分分析估计后向散射的方法^[68];将直方图处理与基于偏振差分的散射去除模型相结合的方法^[69];通过小波变换将图像分解到不同空间频率并分别对高低频进行处理的方法^[70];通过矫正透射率减少噪声与失真的方法^[61]等.为了解决偏振散射介质成像的颜色畸变问题,目前存在两类主流方式:文献[71]考虑RGB通道之间的串扰效应来解决颜色失真的方式(参考文献[71]中的图 5 和 6)以及文献[72]直接使用单一通道准确估计偏振度的方法.尽管基于偏振差分成像的方法系统与算法复杂度低,但在复杂条件下因为偏振信息维度低,对成像过程的光的散射并不能完整的描述,所以表现不佳.同时该方法依赖于先验知识的可靠性,且该方法假设目标是无偏的,这也导致该方法无法区分不同偏振特性的物体.

3.1.2 基于 Stokes 成像的方法

由于 Stokes 矢量配置中的信息维度 (偏振子图像的数量) 比偏振差分成像系统中的两个更高 (即 线性 Stokes 为 3 个, 完整 Stokes 为 4 个), Stokes 矢量更适合表征散射光的偏振特性.相比之下, 由 于与散射光属性高度相关的两个重要参数 (AoP 和 DoP) 可以直接从 Stokes 参数推导出来, 因此将 Stokes 分析引入散射去除是有希望的. 探测器扫描接收到的光的斯托克斯矢量表示为

$$S_I(x,y) = S_D(x,y) + S_B(x,y),$$
(12)

其中 S_D 代表着直接透射光的 Stokes 矢量, S_B 代表着后向散射光的 Stokes 矢量. 基于 Stokes 成像的 恢复算法仍然是对 B_{∞} 和 t 的有效估计, 可以表示为

$$(B_{\infty}, t(x, y)) = f(P, P_l, P_c, \operatorname{Aop}), \qquad (13)$$

其中 P, P, P, 和 AoP 分别代表场景的偏振度、线偏振度、圆偏振度与偏振角. 根据所用的信息不同, 基于 Stokes 成像的方法可以分为: (1) 基于 Stokes 矢量的方法: 如文献 [73] 让光源以正交的偏振状态 照射物体, 将原始图像转换为斯托克斯图, 并基于斯托克斯矢量分解模型, 从而去除散射光; 文献 [74] 在没有检偏器旋转的情况下,在斯托克斯矢量的基础上获取更精确的偏振差分图像.(2)基于 P.的方 法: 文献 [75] 基于圆偏振光的保偏特性, 利用圆偏图像与强度图像进行去雾; 文献 [76] 结合圆偏振信 息和线偏振信息的图像恢复方法,使用圆偏振光束照亮浑水中的物体,将介质散射产生的线偏振光与 物体反射的圆偏振光分离从而去除散射光. (3) 基于 AoP 的方法: 文献 [77] 对散射介质模型中的两 个关键参数 (B 和 B_{∞}) 有效和精确的估计, 而不对 DoP 进行估计. (4) 基于 Stokes 成像与图像处理 相结合的方法: 文献 [78] 分析了后向散射光的分布, 使用低秩稀疏矩阵分解估计后向散射光的偏振度 和偏振角,利用偏振信息的低秩特性重建清晰场景; 文献 [79] 基于目标反射光和后向散射光的互信息 独立特性建立优化函数分离散射光 (参考文献 [79] 中的图 8); 文献 [80] 引入斜边法进行估计点扩散 函数 (point spread function, PSF) 与调制传递函数 (modulation transfer function, MTF) 评估分辨率 随空间频率的变化,对恢复图像分辨率增强. (5) 基于偏振 Stokes 成像与其他硬件技术相结合的方法: 文献 [81] 将距离选通技术与偏振相结合,利用偏振信息区分具有不同散射过程的光子;文献 [82] 利用 红外辐射对散射介质具有更强透过能力的性质提出了一种基于可见光和红外图像融合的方法提高图 像的可见性.

基于 Stokes 成像的方法计算复杂度虽高于偏振差分成像,但其计算复杂度仍比较低. 随着微偏振 列相机的发展, Stokes 矢量的计算通过单张偏振马赛克图像即可完成,这大大拓宽了应用场景,提高了 实际应用价值.

3.1.3 基于穆勒矩阵成像

与通常用于表征光束偏振特性的 Stokes 矢量不同,穆勒矩阵包含了目标材料的所有偏振信息.当 光与场景相互作用时,反射率和入射的偏振态之间的关系可以表示为

$$S_{\text{out}} = (\alpha M_b + \beta M_d) \cdot S_{\text{in}},\tag{14}$$

其中 S_{out} 和 S_{in} 分别是来自场景的反射光和场景中的入射光的 Stokes 矢量; M_b 和 M_d 分别表示后 向散射和直接透射的穆勒矩阵, α 和 β 分别为前者和后者对应的权重因子, 由光在混浊介质中的传输 特性决定, 满足 α + β = 1 的关系. 基于穆勒矩阵的方法的核心就是对光源的偏振态进行调制, 对散 射介质的传播过程进行解耦求解, 以达到后向散射与直接透射的分离. 文献 [83] 分析了后向散射光的 偏振态与照明光束之间的关系, 并基于这种关系对相机的偏振态分析器进行调制, 以最佳的方式滤除 后向散射, 直接提高拍摄到的图像质量. 文献 [84] 提出了一种基于 3 × 3 穆勒矩阵和主动照明调制的 方法, 利用主动成像的偏振态对成像过程的影响在偏振差分图像上进行图像去散射 (参考文献 [84] 中 的图 7 和 8). 文献 [85] 认为后向散射光比直接传输到成像系统的光路径更长, 衰减的可能性更高. 所 以当介质中没有目标时, 检测器记录的分量是后向散射, 否则记录的分量是后向散射和直接透射的总 和, 直接透射光可以基于这两个检测的减法来测量. 基于穆勒矩阵的方法能够区分具有不同偏振特性 的目标与介质, 但是其系统具有很高的复杂度, 为了计算穆勒矩阵的参数需要获取同一场景的多幅不 同偏振角的偏振图像 (忽略圆偏信息需要 9 幅, 否则需要 16 幅), 这大大限制了其应用场景.

3.1.4 基于深度学习的方法

随着深度学习在图像复原中的快速发展,研究已经从单纯依赖最优模型参数选择转向自动训练模型. 基于深度学习的方法已经从端到端的纯数据驱动方法转变为数据模型联合驱动的方法,能够有效估计各类物理参数^[86].根据是否利用参考图像,基于深度学习的方法可以分为全监督方法与自监督/无监督方法.随着对全监督网络的研究,全监督方法的广泛发展使其不再拘泥于端到端方法^[87],能够利用各种模型对算法进行优化与改进:文献 [88] 构建了一种使用卷积神经网络处理颜色、强度和偏振信息的方法,利用不同信息之间的关系与偏振损失,该方法可以有效抑制复原图像的失真;文献 [99] 提出了一种3个角度线偏图像与圆偏图像作为输入的轻量化的端对端散射介质成像网络;文献 [90] 基于通用去雾模型估计参考图像,在参考图像的指导下融合输入的模糊偏振图像;文献 [91] 将全监督网络结合物理模型,将偏振模糊图像输入 U-Net 获得去散射图像;文献 [92] 利用恢复图像生成模糊图像,通过计算生成的模糊图像与捕获图像之间的损失构建去散射结果.随着深度网络的进一步发展,基于自监督与无监督网络的方法也逐步得到发展与应用:文献 [93] 在模型中加入基于物理的偏振光学信息和无参考先验约束,利用引导和约束模型的自训练过程提高图像去雾效果 (参考文献 [93] 中的图 2和 3);文献 [94] 采用无监督的生成对抗网络 U²R-pGAN 进行不用配对的水下图像恢复;文献 [95] 将 背景光视为空间可变参数,设计了一个无监督端到端生成网络恢复背景光.

目前,基于深度学习方法在散射介质中这一问题上取得了很大的成功.基于深度学习的方法的关键是训练集的获取.由于很难找到具有足够有效水下基准的数据集,因此大多数基于学习的方法都依赖合成图像来学习深度神经网络,这可能会遇到泛化性的问题.而基于自监督或无监督的方法虽然不



图 6 (网络版彩图) 偏振视觉目标检测原理

Figure 6 (Color online) Target detection of polarization imager. (a) Camouflage target's detection; (b) target on the water surface; (c) transparent object's detection

需要成对的数据集,但也极易依赖损失函数的选择.

3.2 目标检测

3.2.1 伪装目标检测

不同材料、不同表面粗糙度、不同形状的人造物体如油漆、金属板、玻璃等在不同的可见光、红 外光波段下具有较大的偏振特性差异,但相比自然物体,人造物体表面光滑度更高、形状更规则,因此 具有更强的偏振态^[96~98] (图 6),这使偏振视觉能有效凸显自然环境中的人造目标,在对抗伪装目标 或检测透明目标方面具有显著的优势^[99] (参考文献 [99] 中的图 1-7, 1-9, 7-14, 8-15, 8-16).由于伪装 的目的是欺骗人眼视觉系统或红外成像系统,降低被发现的概率,因此伪装目标大多会使用迷彩伪装 与红外伪装以避免在可见光或红外等波段被敌人发现.

为了从自然环境中检测、识别伪装目标,人们开展了基于偏振视觉的伪装目标检测方法的研究. 偏振信息能显著增加人造目标与背景之间的对比度^[100],并且偏振视觉对光线强度敏感度很低,使用 偏振成像系统获取偏振度、偏振角等信息即可有效突出自然场景下难以辨识的伪装目标,例如草地中 的绿色伪装^[101]、黑夜中的隐藏目标与隐藏于阴影内的目标^[102].在面对红外伪装时,偏振视觉也能够 利用偏振信息分辨缺少细节信息且并与背景温度相近的伪装目标^[103,104]并提升图像质量^[105],使其



图 7 (网络版彩图) 偏振视觉目标检测跟踪效果 Figure 7 (Color online) Target detection and tracking result of polarization imager

在检测伪装的军事目标、草丛中的地雷^[106]、快速飞行的无人机等^[107](图 7)目标时能够有效凸显目标(参考文献 [107]中的图 3),降低检测难度.同时,偏振视觉对烟雾、扬尘等散射介质的抵抗性,使偏振成像系统能将复杂天气下的目标检测准确性提高 20%~50%,并在具有强反射、噪声与辐射畸变的复杂场景下保持优异的目标检测能力^[108,109].为了获取更好的检测结果,基于偏振视觉的伪装目标检测会在获取偏振信息的基础上基于信息熵、字典学习、稀疏分解、HIS 图像等方法^[110,111]进行图像融合(参考文献 [110]中的图 2),进一步提高伪装目标与背景的对比度.近年来随着人工智能与深度学习方法的兴起,人们开始研究如何将深度学习方法应用于偏振视觉的伪装目标检测,实现了伪装目标的快速检测识别^[112,113].由于偏振度、偏振角与物体表面法线方向和成像设备之间的角度有关,受幼年凤尾鱼的捕猎过程启发,人们发现除了使用图像融合等方法外,在成像过程中选择合适的成像角度同样能大幅提高目标与背景之间的偏振信息差异,显著提升目标检测准确性与检测距离^[108,114],识别出使用树枝、草丛等自然物体进行覆盖伪装的目标^[115].总的来说,偏振视觉相比可见光、红外等视觉技术在目标的检测、识别与跟踪^[116]等领域具有显著优势,并使其在民用领域如道路检测等方面得到了广泛的应用^[117,118].

3.2.2 水面目标检测

由于偏振视觉能对抗耀光对成像带来的影响,因此在检测水面目标时能够有效去除水面耀光对成 像造成的影响,并利用水面和人造物体在偏振信息上的差异识别与背景没有明显颜色差异或温度差异 的目标^[119].偏振视觉检测水面目标的优势使其在水面溢油检测、舰船尾迹检测等领域起到重要作用. 水面与油面均是较为光滑的表面,在无偏的太阳光照射到两者的表面时其反射光均为部分偏振光,由 于偏振光携带有物体的材质信息,因此可以利用反射的偏振信息将水面与溢油分离,从而实现水面溢 油检测^[120,121].不论在可见光波段还是红外波段,在检测水面溢油时都会不可避免的受环境影响.利 用可见光成像检测水面溢油时易受光照影响,在光线不足时难以获取清晰图像;利用红外成像检测时 由于环境温度变化,溢油与水面的对比度将发生较大的改变.而在偏振图像下溢油与水面具有较强的 对比度,并且不受光照条件、水面耀光、生态环境等自然条件的影响,在全天候溢油检测中的表现显著 优于可见光与红外成像.与溢油检测相似,在检测水面舰船尾迹时,利用偏振成像设备可以获取充满 大量气泡的 V 形尾迹与水面反射的不同偏振信息从水面上分离舰船航行路径^[122].即使是航行于水 下的潜艇,通过偏振视觉也能有效识别水下航行在水面产生的航迹,判断舰艇位置与深度^[123] (参考文 献 [123] 中的图 21).



图 8 (网络版彩图) 偏振去反射与反射分离物理模型 Figure 8 (Color online) Physical model of specularity removal and reflection separation based on polarization imaging

3.2.3 透明目标检测

偏振视觉对透明目标如玻璃、塑料等具有较强的检测能力,面对透明目标时,偏振视觉能有效利用其光滑表面产生的明显偏振特征检测透明目标^[124].对透明物体较强的检测能力使偏振成像被广泛应用于透明物体场景分割^[125] (参考文献 [125] 中的图 1)、透明物体检测^[126] (参考文献 [126] 中的图 1),以及透明物体三维重构等领域^[127],利用这种特性,偏振视觉能够有效捕捉图像中的透明目标,即使处于快速运动中,偏振信息也能有效地将透明物体从背景中分离,实现透明物体的检测^[128].

3.3 偏振视觉的其他应用

3.3.1 基于偏振信息的镜面反射去除

由于镜面反射和漫反射成分具有不同的偏振度,当一束光被反射时,在大多数入射角的情况下,镜 面反射的偏振度大于漫反射的偏振度.当旋转偏振片时,强度的变化只与镜面反射有关,因此可根据 该特性分离镜面反射和漫反射,如图 8 所示. Wolff 和 Boult^[129,130] 首次提出利用上述特性来完成镜 面反射和漫反射的分离.为了减少分离结果的色彩失真,后续有学者借助色彩约束如颜色空间约束或 者偏振引导的色度约束来共同实现镜面反射和漫反射分离^[131~133] (参考文献 [132] 中的图 5);或者利 用反射分量的偏振统计特性应用 ICA 实现分离^[134],在偏振物理模型中引入多尺度方案、结合双色反 射模型等^[135,136] (参考文献 [135] 中的图 13~18).

传统方法能够在受控环境下以及合成数据上分离反射分量,但是大多都需要很强的假设,如假设入射光是非偏的、或两分量是相互独立的,难以适用于真实环境.因此,尽管利用了偏振信息,但是在 真实世界中仍具有挑战性.近年来深度学习快速发展,也广泛应用于反射分离领域中.但其需要大量 的训练数据才能有较好的效果,此外没有物理模型的约束也无法学习具有物理意义的特征,因此现有 方法主要从数据生成和物理模型约束方面进行改进.

在数据生成方面,有学者提出一种模拟多种真实环境的合成图像生成策略,如非理想 (弯曲)的表面,非静态场景、高动态范围场景等^[137] (参考文献 [137] 中的图 10).在此基础上,Lei 等^[138] 发现现有数据集中由于玻璃的折射现象存在不对齐的问题,会导致分离后的图像出现错误,因此设计了一种新的数据构建方法,获取的透射图像与输入图像能够完全吻合.

在物理模型约束方面,为了解决传统方法在受控条件下的反射分离,Li等^[139]将反射去除问题推 广到更复杂的真实场景中,其建立多次反射光线中偏振态变化的模型,用偏振引导的光线追踪模型和 损失函数设计来监督图像反射分离.与以往3个或更多偏振图像输入的工作不同,Lyu等^[140]提出一 种只利用一对非偏振和偏振图像的物理约束来分离反射分量和透射分量,其首先估计半反射面的法线



Figure 9 (Color online) Specularity removal of polarization imaging

方向以构造良好的物理图像,然后利用基于物理和数值分析的附加网络来学习反射分量的可靠分离, 对于之前提到的不对齐问题,还引入了一个运动估计网络来处理成对输入的错位问题.

3.3.2 偏振导航

偏振导航指的是人类通过模仿昆虫的偏振敏感神经,借助天空中的偏振光实现导航的一种技术. 如图 9 所示,以观察者 O 为原点建立在地平坐标系,观测点 P 处的偏振光 E 矢量振动方向垂直于太 阳、观察者和观测点所构成的平面 OPS. 天空偏振光的分布模式可以抽象为以太阳为圆心, E 矢量环 绕形成的一个个同心圆,关于过太阳与天顶的子午线呈对称分布,当 E 矢量与太阳成 90° 时天空偏 振光具有最大的偏振度.随着一天内的时间推移,太阳高度的变化将引起 E 矢量相对对称轴位置的变 化,但子午线上的 E 矢量振动方向始终与子午线垂直.偏振导航的基本原理是通过获取天顶点的偏振 方位角得到自身与太阳矢量间的夹角,解算当前的航向信息.近年来,人们对天空偏振信息的探测结 果表明,无论是多云^[141]、阴天^[142]还是雾霾天^[143],天空的偏振分布模式都比较稳定,能够以此为基 础进行导航,这与昆虫的偏振导航研究结果相吻合.在灰尘、雾霾等天气的干扰下, E 矢量振动分布模 式相比太阳光强度变化与天空光频谱变化受到的影响更小^[144],使人们确立了以探测 E 矢量振动方 向为策略的偏振导航方法.根据成像方式的不同,偏振导航可以分为点源式和成像式两种不同类别.

点源式偏振导航设备通过模仿昆虫复眼中成对的神经元模型探测天顶点偏振方位角,得到自身体 轴与太阳子午线间夹角并结合太阳方位角获取航向信息,例如文献 [145] 构造的单方向六通道仿生导 航传感器样机通过获取单一方向的天空偏振信息进行导航 (参考文献 [145] 中的图 1). 然而由于点源 式传感器只能测量天空中某一点的偏振信息,容易受天气等环境因素影响,鲁棒性较差,为获取鲁棒性 更强的导航结果,人们构建了能够获取多个不同方向偏振信息的导航设备,如文献 [146] 构建的融合两 个不平行方向的偏振光传感器,以及文献 [147] 构建的多方向阵列分布的偏振光导航传感器 (参考文 献 [147] 中的图 2),实时检测天空多个方向的偏振光信息,对多方向信息的优选和融合.

成像式偏振导航设备主要使用多个偏振成像设备 (图 10), 获取至少 3 个方向的天空偏振图像, 通 过解算斯托克斯矢量获取全天空偏振方位角图, 并利用图像处理算法直接提取太阳子午线以获取航向 信息. 文献 [148] 构建了一种基于斯托克斯矢量测量偏振方位角的三通道成像式偏振光导航装置 (参 考文献 [148] 中的图 2), 采用 3 个相机获取三通道偏振图像进行偏振信息解算. 然而由工业相机和线



Figure 10 (Color online) Classification of polarization navigation devices

偏振器制成的成像式偏振传感器需要将多个成像模块组合才能解算天空的偏振信息,导致传感器具有 较大的体积且不可避免的在各模块间存在安装误差,限制了设备的应用场景.

为提高偏振导航设备的泛用性,使其能应用于更多场景,多位学者展开了对偏振导航设备集成化的研究.如基于严格耦合波理论设计的对蓝紫光波段敏感的双层金属纳米光栅^[149],以及金属纳米光栅与光电探测器集成工艺的探索^[150].此外还有学者利用紫外纳米压印工艺实现了金属纳米光栅与CMOS 图像传感器的集成,探索了偏振导航传感器集成化的可行性^[151].这种集成式的成像设备可一次采集多个方向的天空偏振图像,且兼具小型化、可快照式等特点,是未来偏振导航的发展方向.

3.3.3 基于偏振信息的三维重建

三维重建技术是一种构建物体形状与物体外观的技术,在计算机视觉应用领域有着重要的应用 ^[152,153].目前较为主流的方法是使用激光雷达、结构光、双目视觉等方式获取三维数据,但这些方法存在价格昂贵、速度较慢^[154]、检测范围有限、计算复杂^[155]、对高反射低纹理目标复原效果较差^[156]、匹配困难^[157]等各种问题.基于偏振信息恢复表面形态的方法使用一个简单的偏振成像系统获取表面反射光的偏振信息,然后对偏振信息进行解算来估计物体表面三维形状.

如图 11 所示, 自然光被物体表面反射后, 反射光会变成部分偏振光. 一个线性偏振器被放置在成像设备的前面, 设备接收到的光线强度随着线性偏振器的旋转角度而变化:

$$I = \frac{I_{\max} + I_{\min}}{2} + \frac{I_{\max} - I_{\min}}{2} \cos(2\theta - 2\varphi),$$
(15)

其中 I_{max} 和 I_{min} 代表最大和最小强度, θ 是旋转偏振片的角度. 通过旋转偏振片, 即可获取 $I_0, I_{45}, I_{90}, I_{135}.$

三维重建的关键是需要获取准确的物体表面法向量,通常物体表面的法向量可以由物体的天顶角 φ 与方位角 α 表示,而天顶角与方位角又可以利用偏振度与偏振角表示.光滑表面的反射光包含镜面



图 11 (网络版彩图) 目标物体表面法向量示意图 **Figure 11** (Color online) Normal vector of the object's surface

反射成分和漫反射成分,其中镜面反射光的天顶角和偏振度、方位角和偏振角之间的关系可以表示为

$$DoP = \frac{2\sin^2\phi\cos\phi\sqrt{n^2 - \sin^2\phi}}{n^2 - \sin^2\phi - n^2\sin^2\phi + 2\sin^4\phi},$$

$$AoP = \alpha \mp \pi/2.$$
(16)

而对于漫反射,这两组对应关系可以表示为

$$DoP = \frac{(n - 1/n)^2 \sin^2 \phi}{2 + 2n^2 - (n - 1/n)^2 \sin^2 \phi + 4 \cos \phi \sqrt{n^2 - \sin^2 \phi}},$$
(17)
AoP = α .

通过偏振度和偏振角求得天顶角和方位角后,利用天顶角与方向角即可求得物体表面法向量 n:

$$n = \begin{cases} -\frac{\partial f(x,y)}{\partial x} \\ -\frac{\partial f(x,y)}{\partial y} \\ 1 \end{cases} = \begin{cases} -z_x(x,y) \\ -z_y(x,y) \\ 1 \end{cases} = \begin{cases} \tan\phi\cos\alpha \\ \tan\phi\sin\alpha \\ 1 \end{cases},$$
(18)

其中 f(x,y) 为物体的表面方程, $z_x(x,y)$ 和 $z_y(x,y)$ 为物体表面梯度信息. 得到物体的表面法向量后, 对法向量进行积分即可得到物体表面的三维形状信息 (图 12).

现有的偏振三维重建技术主要分为基于镜面反射的偏振三维重建方法、基于漫反射的偏振三维 重建技术和偏振与辅助信息结合的三维重建技术.

基于镜面反射的偏振三维重建方法由于镜面反射光包含的偏振信息具有易于探测、表征明显等 特点,因此被广泛应用于金属、陶瓷、玻璃等物体的三维成像过程,然而这种方法的入射角和方位角求 解存在多值问题.为解决入射角的多值问题,有学者提出利用目标物体的多光谱偏振特性求解入射角 与折射率的方法,使用反射光与偏振片旋转角之间的关系和菲涅尔定律实现同时估计目标物体的入射 角与折射率^[158];针对方位角的多值问题,也有学者提出利用将高频区域方位角信息向低频区域扩散 的方法^[159],该方法能够解决低频区域的多值问题 (参考文献 [159] 中的图 7),从而实现复杂表面目标 的高精度三维重建.

由于基于镜面反射的偏振三维成像技术易受环境光影响且并不能对大多数非理想朗伯体进行三维重建,因此越来越多的研究人员开始关注基于漫反射的偏振三维成像技术. Atkinson 等^[160]提出了

1636



图 12 (网络版彩图) 偏振三维重构结果 Figure 12 (Color online) Polarization 3D reconstruction result

基于漫反射偏振的物体表面形状恢复物理模型 (参考文献 [160] 中的图 8), 利用漫反射的偏振度和相 位信息分别估计天顶角和方位角.

上述方法都会假设物体表面的反射光只包含镜面反射光或漫反射光^[161~163],然而实际场景中许 多物体的表面反射光同时包含这两种反射光^[164],这使得只考虑其中一种反射光的方法在实际应用中 经常出现严重的误差^[165].因此偏振与辅助信息结合的三维重建技术得到了广泛的研究,如结合光度 立体几何^[166]、阴影信息^[162,167]来约束偏振成像,或者联合深度传感器^[168]、双目视觉^[169,170]或多 视角图像^[171]提供的粗糙深度图对多种反射进行处理.近年来深度学习也应用到偏振三维重建领域 中,有学者利用三维扫描仪得到的三维模型监督网络训练^[172]以及深度图和视角编码的辅助^[164]也 取得了更准确的重建结果 (参考文献 [164] 中的图 7 和 8).

4 结束语

近年来,偏振视觉随着分焦平面偏振成像技术的产生得到了快速的发展.分焦平面偏振成像技术 使成像设备实现了小型化与高实时性,并大幅降低了设备成本,这一方面降低了偏振视觉技术的研究 成本,促进了对偏振视觉技术的研究,另一方面降低了偏振成像系统的应用门槛,使偏振视觉在各领域 的应用逐步从理论走向实践.

未来对偏振视觉的研究将分别从硬件设备与软件算法处理两方面展开.其中硬件设备将向着全偏 振、高分辨率、复合化与智能化发展.通过偏振器件的设计与制备以及集成工艺的优化,提高消光比并 减少不同偏振角度的串扰,进一步提高系统的成像精度与复杂环境下图像质量;软件算法则将通过物 理模型的优化细化以及与最新图像处理技术的有效结合降低噪声并提高处理后的图像质量,向高实时 性、高精度与智能化发展.

偏振视觉作为一种新兴的视觉技术,在应用层面仍有较大的潜力亟待发掘.目前偏振视觉在目标 检测、散射介质成像、去镜面反射、三维重构、偏振导航等领域的应用已经取得了一定的进展.未来偏 振视觉将受益于材料学、物理学、工艺技术与人工智能的发展,利用偏振信息突破传统视觉技术的局 限性,有望进一步在火场救援、医疗诊断、工业生产、智能驾驶等领域得到应用.

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. Appl Opt, 2006, 45: 5453–5469
- 2 Goldstein D H. Polarized Light. Boca Raton: CRC Press, 2017
- 3 Zhao Y Q, Li N, Zhang P, et al. Infrared polarization perception and intelligent processing. Infr Laser Eng, 2018, 47: 9–15 [赵永强, 李宁, 张鹏, 等. 红外偏振感知与智能处理. 红外与激光工程, 2018, 47: 9–15]
- 4 Frisch K V. Die polarisation des himmelslichtes als orientierender faktor bei den Tänzen der Bienen. Experientia, 1949, 5: 142–148
- 5 Rossel S, Wehner R. Polarization vision in bees. Nature, 1986, 323: 128-131
- 6 Land M F. Polarizing the world of fish. Nature, 1991, 353: 118-119
- 7 Lerner A, Shashar N. Polarized Light and Polarization Vision in Animal Sciences. Berlin: Springer, 2014
- 8 Greif S, Borissov I, Yovel Y, et al. A functional role of the sky's polarization pattern for orientation in the greater mouse-eared bat. Nat Commun, 2014, 5: 4488
- 9 Kleinlogel S, Marshall N J, Horwood J M, et al. Neuroarchitecture of the color and polarization vision system of the Stomatopod haptosquilla. J Comp Neurol, 2003, 467: 326–342
- 10 Marshall N J, Messenger J B. Colour-blind camouflage. Nature, 1996, 382: 408-409
- 11 Narendra A, Alkaladi A, Raderschall C A, et al. Compound eye adaptations for diurnal and nocturnal lifestyle in the intertidal ant, Polyrhachis sokolova. PLoS One, 2013, 8: e76015
- 12 Warrant E J, Kelber A, Gislén A, et al. Nocturnal vision and landmark orientation in a tropical halictid bee. Curr Biol, 2004, 14: 1309–1318
- 13 Belušič G, Šporar K, Meglič A. Extreme polarization sensitivity in the retina of the corn borer moth Ostrinia. J Exp Biol, 2017, 220: 2047–2056
- 14 Meglič A, Ilić M, Pirih P, et al. Horsefly object-directed polarotaxis is mediated by a stochastically distributed ommatidial subtype in the ventral retina. Proc Natl Acad Sci USA, 2019, 116: 21843–21853
- 15 Marshall N, Jones J, Cronin T. Behavioural evidence for colour vision in stomatopod crustaceans. J Comp Phys A, 1996, 179: 473–481
- 16 Cameron D A, Pugh Jr E N. Double cones as a basis for a new type of polarization vision in vertebrates. Nature, 1991, 353: 161–164
- 17 Karman S, Diah S, Gebeshuber I. Bio-inspired polarized skylight-based navigation sensors: a review. Sensors, 2012, 12: 14232–14261
- 18 Dacke M, Nordström P, Scholtz C H. Twilight orientation to polarised light in the crepuscular dung beetle Scarabaeus zambesianus. J Exp Biol, 2003, 206: 1535–1543
- 19 Muheim R, Phillips J B, Åkesson S. Polarized light cues underlie compass calibration in migratory songbirds. Science, 2006, 313: 837–839
- 20 Wan Z, Zhao K, Chu J. Robust azimuth measurement method based on polarimetric imaging for bionic polarization navigation. IEEE Trans Instrum Meas, 2019, 69: 5684–5692
- 21 Cartron L, Darmaillacq A S, Jozet-Alves C, et al. Cuttlefish rely on both polarized light and landmarks for orientation. Anim Cogn, 2012, 15: 591–596
- 22 Graydon O. Global position by polarization. Nat Photon, 2018, 12: 318
- 23 Cronin T W. Camouflage: being invisible in the open ocean. Curr Biol, 2016, 26: R1179–R1181
- 24 Mcfall-ngai M J. Crypsis in the pelagic environment. Am Zool, 1990, 30: 175–188
- 25 Jaffe J S. Underwater optical imaging: the past, the present, and the prospects. IEEE J Ocean Eng, 2015, 40: 683–700
- 26 Johnsen S, Marshall N J, Widder E A. Polarization sensitivity as a contrast enhancer in pelagic predators: lessons from in situ polarization imaging of transparent zooplankton. Phil Trans R Soc B, 2011, 366: 655–670
- 27 Denton E J. Review lecture: on the organization of reflecting surfaces in some marine animals. Philos Trans Royal Soc London B Biol Sci, 1970, 258: 285–313
- 28 Rowe D M, Denton E J. The physical basis of reflective communication between fish, with special reference to the horse mackerel, Trachurus trachurus. Phil Trans R Soc Lond B, 1997, 352: 531–549
- 29 Flamarique I N. Swimming behaviour tunes fish polarization vision to double prey sighting distance. Sci Rep, 2019,

9:944

- 30 Cartron L, Josef N, Lerner A, et al. Polarization vision can improve object detection in turbid waters by cuttlefish. J Exp Mar Biol Ecol, 2013, 447: 80–85
- 31 Gagnon Y L, Templin R M, How M J, et al. Circularly polarized light as a communication signal in mantis shrimps. Curr Biol, 2015, 25: 3074–3078
- 32 Chiou T H, Caldwell R L, Hanlon R T, et al. Fine structure and optical properties of biological polarizers in crustaceans and cephalopods. In: Proceedings of Polarization: Measurement, Analysis, and Remote Sensing VIII, 2008, 6972: 11–20
- 33 Marshall N J, Powell S B, Cronin T W, et al. Polarisation signals: a new currency for communication. J Exp Biol, 2019, 222: 134213
- 34 Chiou T H, Mäthger L M, Hanlon R T, et al. Spectral and spatial properties of polarized light reflections from the arms of squid (Loligo pealeii) and cuttlefish (Sepia officinalis L.). J Exp Biol, 2007, 210: 3624–3635
- 35 Messenger J B. Cephalopod chromatophores: neurobiology and natural history. Biol Rev, 2001, 76: 473–528
- 36 Tyo J S. Design of optimal polarimeters: maximization of signal-to-noise ratio and minimization of systematic error. Appl Opt, 2002, 41: 619–630
- 37 Garlick G F J, Steigmann G A, Lamb W E. Differential optical polarization detectors. U.S. Patent, 3 992 571. 1976-11-16
- 38 Azzam R M A. Arrangement of four photodetectors for measuring the state of polarization of light. Opt Lett, 1985, 10: 309–311
- 39 Barter J D, Lee P H Y, Thompson Jr H R, et al. Stokes parameter imaging of scattering surfaces. In: Proceedings of Polarization: Measurement, Analysis, and Remote Sensing, 1997, 3121: 314–320
- 40 Gruev V, Perkins R, York T. CCD polarization imaging sensor with aluminum nanowire optical filters. Opt Express, 2010, 18: 19087–19094
- 41 Bayer B E. Color imaging array. U.S. Patent, 3 971 065. 1976-7-20
- 42 Zhao Y Q, Zhang Y C, Liu W T, et al. Polarization imaging by micro-polarizer array. Infrared Laser Eng, 2015, 44: 3117–3123 [赵永强, 张字辰, 刘吾腾, 等. 基于微偏振片阵列的偏振成像技术研究. 红外与激光工程, 2015, 44: 3117–3123]
- 43 Brock N J, Crandall C, Millerd J E. Snap-shot imaging polarimeter: performance and applications. In: Proceedings of Polarization: Measurement, Analysis, and Remote Sensing XI, 2014, 9099: 909903
- 44 Malone N R, Kennedy A, Graham R, et al. Staring MWIR, LWIR and 2-color and scanning LWIR polarimetry technology. In: Proceedings of Infrared Remote Sensing and Instrumentation XIX, 2011, 8154: 81540T
- 45 Connor B, Carrie I, Craig R, et al. Discriminative imaging using a LWIR polarimeter. In: Proceedings of Electro-Optical and Infrared Systems, 2008, 7113: 71130K
- 46 Zhang C, Hu J, Dong Y, et al. High efficiency all-dielectric pixelated metasurface for near-infrared full-Stokes polarization detection. Photon Res, 2021, 9: 583–589
- 47 Wang C, Hu J, Wang C. Design and numerical simulation of a pixelated full stokes micropolarizer array. In: Proceedings of the 8th International Symposium on Advanced Optical Manufacturing and Testing Technologies: Design, Manufacturing, and Testing of Micro-and Nano-Optical Devices and Systems, and Smart Structures and Materials, 2016, 9685: 96850K
- 48 Bai J, Wang C, Chen X, et al. Chip-integrated plasmonic flat optics for mid-infrared full-Stokes polarization detection. Photon Res, 2019, 7: 1051
- 49 Rubin N A, D'Aversa G, Chevalier P, et al. Matrix Fourier optics enables a compact full-Stokes polarization camera. Science, 2019, 365: eaax1839
- 50 Martínez A. Polarimetry enabled by nanophotonics. Science, 2018, 362: 750-751
- 51 Espinosa-Soria A, Rodríguez-Fortuño F J, Griol A, et al. On-chip optimal stokes nanopolarimetry based on spin-orbit interaction of light. Nano Lett, 2017, 17: 3139–3144
- 52 Lin Z, Rusch L, Chen Y, et al. Chip-scale, full-Stokes polarimeter. Opt Express, 2019, 27: 4867–4877
- 53 Haessig G, Joubert D, Haque J, et al. Bio-inspired polarization event camera. 2021. ArXiv:2112.01933
- Jeon D S, Meuleman A, Baek S H, et al. Polarimetric iToF: measuring high-fidelity depth through scattering media.
 In: Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2023. 12353–12362

- 55 Yuan S, Ma C, Fetaya E, et al. Geometric deep optical sensing. Science, 2023, 379: eade1220
- 56 Han J, Yang K, Xia M, et al. Resolution enhancement in active underwater polarization imaging with modulation transfer function analysis. Appl Opt, 2015, 54: 3294–3302
- 57 Zhao Y, He W, Ren H, et al. Polarization descattering imaging of underwater complex targets based on mueller matrix decomposition. IEEE Photon J, 2022, 14: 1–6
- 58 Xiang Y, Yang X, Ren Q, et al. Underwater polarization imaging recovery based on polarimetric residual dense network. IEEE Photon J, 2022, 14: 1–6
- 59 Tyo J S, Rowe M P, Pugh E N, et al. Target detection in optically scattering media by polarization-difference imaging. Appl Opt, 1996, 35: 1855–1870
- 60 Gu Y, Carrizo C, Gilerson A A, et al. Polarimetric imaging and retrieval of target polarization characteristics in underwater environment. Appl Opt, 2016, 55: 626–637
- 61 Shen L, Zhao Y, Peng Q, et al. An iterative image dehazing method with polarization. IEEE Trans Multimedia, 2018, 21: 1093–1107
- 62 Fang S, Xia X S, Huo X, et al. Image dehazing using polarization effects of objects and airlight. Opt Express, 2014, 22: 19523–19537
- 63 Jaffe J S. Computer modeling and the design of optimal underwater imaging systems. IEEE J Ocean Eng, 1990, 15: 101–111
- 64 Zhang W, Liang J, Wang G, et al. Review of passive polarimetric dehazing methods. Opt Eng, 2021, 60:
- 65 Li X, Han Y, Wang H, et al. Polarimetric imaging through scattering media: a review. Front Phys, 2022, 10: 153
- 66 Schechner Y Y, Karpel N. Recovery of underwater visibility and structure by polarization analysis. IEEE J Ocean Eng, 2005, 30: 570–587
- 67 Treibitz T, Schechner Y Y. Active polarization descattering. IEEE Trans Pattern Anal Mach Intell, 2008, 31: 385–399
- 68 Shwartz S, Namer E, Schechner Y Y. Blind haze separation. In: Proceedings of IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2006. 1984–1991
- 69 Hu H, Qi P, Li X, et al. Underwater imaging enhancement based on a polarization filter and histogram attenuation prior. J Phys D-Appl Phys, 2021, 54: 175102
- 70 Liu F, Cao L, Shao X, et al. Polarimetric dehazing utilizing spatial frequency segregation of images. Appl Opt, 2015, 54: 8116–8122
- 71 Liu T, Guan Z, Li X, et al. Polarimetric underwater image recovery for color image with crosstalk compensation. Opt Lasers Eng, 2020, 124: 105833
- 72 Liu F, Han P, Wei Y, et al. Deeply seeing through highly turbid water by active polarization imaging. Opt Lett, 2018, 43: 4903–4906
- 73 Li X, Xu J, Zhang L, et al. Underwater image restoration via Stokes decomposition. Opt Lett, 2022, 47: 2854–2857
- 74 Tian H, Zhu J, Tan S, et al. Rapid underwater target enhancement method based on polarimetric imaging. Opt Laser Tech, 2018, 108: 515–520
- 75 Wang H, Wang J, Li X B, et al. Optimization for a polarimetic dehazing method based on the circularly polarized light. Infrared Laser Eng, 2019, 48: 1126001 [王辉, 王进, 李校博, 等. 一种基于圆偏光的偏振去雾成像优化方法. 红外与激光工程, 2019, 48: 1126001]
- 76 Hu H, Zhao L, Li X, et al. Polarimetric image recovery in turbid media employing circularly polarized light. Opt Express, 2018, 26: 25047–25059
- 77 Liang J, Ren L Y, Ju H J, et al. Visibility enhancement of hazy images based on a universal polarimetric imaging method. J Appl Phys, 2014, 116: 173107
- 78 Wei Y, Han P, Liu F, et al. Estimation and removal of backscattered light with nonuniform polarization information in underwater environments. Opt Express, 2022, 30: 40208–40220
- 79 Wei Y, Han P, Liu F, et al. Enhancement of underwater vision by fully exploiting the polarization information from the Stokes vector. Opt Express, 2021, 29: 22275–22287
- 80 Han P, Liu F, Yang K, et al. Active underwater descattering and image recovery. Appl Opt, 2017, 56: 6631–6638
- 81 Guan J, Zhu J. Target detection in turbid medium using polarization-based range-gated technology. Opt Express, 2013, 21: 14152–14158
- 82 Liang J, Zhang W, Ren L, et al. Polarimetric dehazing method for visibility improvement based on visible and

infrared image fusion. Appl Opt, 2016, 55: 8221–8226

- 83 Wang H, Li J, Hu H, et al. Underwater imaging by suppressing the backscattered light based on mueller matrix. IEEE Photon J, 2021, 13: 1–6
- 84 Wang H, Hu H, Jiang J, et al. Polarization differential imaging in turbid water via Mueller matrix and illumination modulation. Optics Commun, 2021, 499: 127274
- 85 Guan J, Ma M, Sun P. Optimization of rotating orthogonal polarization imaging in turbid media via the Mueller matrix. Opt Lasers Eng, 2019, 121: 104–111
- 86 Li X, Yan L, Qi P, et al. Polarimetric imaging via deep learning: a review. Remote Sens, 2023, 15: 1540
- Hu H, Han Y, Li X, et al. Physics-informed neural network for polarimetric underwater imaging. Opt Express, 2022, 30: 22512–22522
- 88 Hu H, Huang Y, Li X, et al. UCRNet: underwater color image restoration via a polarization-guided convolutional neural network. Front Mar Sci, 2022, 9:
- 89 Ren Q, Xiang Y, Wang G, et al. The underwater polarization dehazing imaging with a lightweight convolutional neural network. Optik, 2022, 251: 168381
- 90 Yin J, Wang Y, Guan B. Polarized images-based dehazing from the viewpoint of self-guided multi-image features fusion. In: Proceedings of the 24th International Workshop on Multimedia Signal Processing, 2022. 1–6
- 91 Zhou C, Teng M G, Han Y F, et al. Learning to dehaze with polarization. In: Proceedings of the 35th Conference on Neural Information Processing Systems, 2021. 11487–11500
- 92 Zhu Y, Zeng T, Liu K, et al. Full scene underwater imaging with polarization and an untrained network. Opt Express, 2021, 29: 41865–41881
- 93 Bi P, Wang D, Chen W, et al. Image dehazing based on polarization information and deep prior learning. Optik, 2022, 267: 169746
- 94 Qi P, Li X, Han Y, et al. U²R-pGAN: unpaired underwater-image recovery with polarimetric generative adversarial network. Opt Lasers Eng, 2022, 157: 107112
- 95 Yang S, Qu B, Liu G, et al. Unsupervised learning polarimetric underwater image recovery under nonuniform optical fields. Appl Opt, 2021, 60: 8198–8205
- 96 Tooley R D. Man-made target detection using infrared polarization. In: Proceedings of Polarization Considerations for Optical Systems II, 1990, 1166: 52–59
- 97 Huang Y, Chen L, Li X, et al. Study on the influence factors of camouflage target polarization detection. In: Proceedings of Hyperspectral Remote Sensing Applications and Environmental Monitoring and Safety Testing Technology, 2016. 10156: 16–22
- 98 Åkerlind C, Hallberg T, Eriksson J, et al. Optical polarization: background and camouflage. In: Proceedings of Target and Background Signatures III, 2017. 10432: 22–35
- 99 Zhao Y Q, Li N, Pan Q. Division of Focal Plane Infrared Polarization Photography. Beijing: Science Press, 2022 [赵 永强, 李宁, 潘泉. 分焦平面红外偏振摄像技术. 北京: 科学出版社, 2022]
- Fu Q, Jiang H, Duan J, et al. Target detection technology based on polarization imaging in the complex environment.
 In: Proceedings of International Symposium on Photoelectronic Detection and Imaging, Beijing, 2013. 218–226
- 101 Xue M, Wang F, Xu G, et al. Polarization imaging detection technology research. In: Proceedings of International Symposium on Photoelectronic Detection and Imaging, Beijing, 2013. 1359–1370
- 102 Han Y, Mao B, Wang Y. Target detection based on polarization imaging under bad illumination conditions. In: Proceedings of International Symposium on Photoelectronic Detection and Imaging, Beijing, 2013. 1193–1200
- 103 Zhang L, Yang F, Ji L, et al. Multiple-algorithm parallel fusion of infrared polarization and intensity images based on algorithmic complementarity and synergy. J Electron Imag, 2018, 27: 1
- 104 Li X, Huang Q. Target detection for infrared polarization image in the background of desert. In: Proceedings of the 9th International Conference on Communication Software and Networks, Guangzhou, 2017. 1147–1151
- 105 Bieszczad G, Gogler S, Krupiński M. Polarization state imaging in long-wave infrared for object detection. In: Proceedings of Electro-Optical Remote Sensing, Photonic Technologies, and Applications VII, and Military Applications in Hyperspectral Imaging and High Spatial Resolution Sensing, 2013. 8897: 257–261
- 106 Forssell G. Surface landmine and trip-wire detection using calibrated polarization measurements in the LWIR and SWIR. In: Proceedings of Subsurface and Surface Sensing Technologies and Applications III, 2001. 4491: 41–51

- 107 Ratliff B M, LeMaster D A, Mack R T, et al. Detection and tracking of RC model aircraft in LWIR microgrid polarimeter data. In: Proceedings of Polarization Science and Remote Sensing V, 2011. 8160: 29–41
- 108 Blin R, Ainouz S, Canu S, et al. Road scenes analysis in adverse weather conditions by polarization-encoded images and adapted deep learning. In: Proceedings of IEEE Intelligent Transportation Systems Conference, Auckland, 2019. 27–32
- 109 Fan W, Ainouz S, Meriaudeau F, et al. Polarization-based car detection. In: Proceedings of the 25th IEEE International Conference on Image Processing, Athens, 2018. 3069–3073
- 110 Yuan H, Zhou P, Wang X. Research on polarization imaging information parsing method. In: Proceedings of Selected Papers of the Chinese Society for Optical Engineering Conferences Held July, 2016. 10141: 343–350
- Wang Q, Wang J, Zhao D, et al. Recognition of camouflage targets with hyper-spectral polarization imaging system.
 In: Proceedings of International Symposium on Photoelectronic Detection and Imaging, Beijing, 2013. 8910: 428–433
- 112 Shen Y, Lin W, Wang Z, et al. Rapid detection of camouflaged artificial target based on polarization imaging and deep learning. IEEE Photon J, 2021, 13: 1–9
- Hao Y, Wu X, Mao J, et al. Augmenting object detection in adverse conditions with polarization-encoded images.
 In: Proceedings of International Conference on Guidance, Navigation and Control, Harbin, 2023. 6460–6468
- In: Proceedings of International Conference on Optical Instruments and Technology, Phuket, 2020. 197–206
- 115 Nordin G P, Meier J T, Deguzman P C, et al. Micropolarizer array for infrared imaging polarimetry. J Opt Soc Am A, 1999, 16: 1168–1174
- 116 Qiao X, Zhao Y, Chen L, et al. Mosaic gradient histogram for object tracking in DoFP infrared polarization imaging. ISPRS J Photogramm Remote Sens, 2022, 194: 108–118
- 117 Li N, Zhao Y, Pan Q, et al. Illumination-invariant road detection and tracking using LWIR polarization characteristics. ISPRS J Photogramm Remote Sens, 2021, 180: 357–369
- 118 Sheeny M, Wallace A, Emambakhsh M, et al. POL-LWIR vehicle detection: convolutional neural networks meet polarised infrared sensors. In: Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops, 2018. 1247–1253
- 119 Harchanko J S, Chenault D B. Water-surface object detection and classification using imaging polarimetry. In: Proceedings of Polarization science and remote sensing II, 2005. 5888: 330–336
- 120 Chenault D B, Vaden J P, Mitchell D A, et al. Infrared polarimetric sensing of oil on water. In: Proceedings of Remote Sensing of the Ocean, Sea Ice, Coastal Waters, and Large Water Regions, 2016. 9999: 89–100
- 121 Chenault D B, Vaden J, Mitchell D, et al. New IR polarimeter for improved detection of oil on water. SPIE Newsroom, 2018. https://www.polarissensor.com/app/uploads/2017/05/SPIE-Pyxis-Joint-Exxon-Article.pdf
- 122 Song M, Guo R, Ma X, et al. Polarization reflection distribution characteristics of wakes on the sea surface. Appl Opt, 2022, 61: 7748–7756
- 123 Xue F, Jin W, Qiu S, et al. Airborne optical polarization imaging for observation of submarine Kelvin wakes on the sea surface: imaging chain and simulation. ISPRS J Photogramm Remote Sens, 2021, 178: 136–154
- 124 Mahendru A, Sarkar M. Bio-inspired object classification using polarization imaging. In: Proceedings of the 6th International Conference on Sensing Technology, kolkata, 2012. 207–212
- 125 Mei H, Dong B, Dong W, et al. Glass segmentation using intensity and spectral polarization cues. In: Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, New Orleans, 2022. 12622–12631
- 126 Kalra A, Taamazyan V, Rao S K, et al. Deep polarization cues for transparent object segmentation. In: Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Seattle, 2020. 8602–8611
- 127 Miyazaki D, Kagesawa M, Ikeuchi K. Transparent surface modeling from a pair of polarization images. IEEE Trans Pattern Anal Mach Intell, 2004, 26: 73–82
- 128 Xia P, Ri S, Inoue T, et al. Dynamic phase measurement of a transparent object by parallel phase-shifting digital holography with dual polarization imaging cameras. Opt Lasers Eng, 2021, 141: 106583
- 129 Wolff L B. Using polarization to separate reflection components. In: Proceedings of IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 1989. 363–369
- 130 Wolff L B, Boult T E. Constraining object features using a polarization reflectance model. IEEE Trans Pattern Anal Mach Intell, 1991, 13: 635–657

- 131 Nayar S K, Fang X S, Boult T. Separation of reflection components using color and polarization. Int J Comput Vision, 1997, 21: 163–186
- 132 Wang F, Ainouz S, Petitjean C, et al. Specularity removal: a global energy minimization approach based on polarization imaging. Comput Vision Image Underst, 2017, 158: 31–39
- 133 Wen S, Zheng Y, Lu F. Polarization guided specular reflection separation. IEEE Trans Image Process, 2021, 30: 7280–7291
- 134 Umeyama S, Godin G. Separation of diffuse and specular components of surface reflection by use of polarization and statistical analysis of images. IEEE Trans Pattern Anal Mach Intell, 2004, 26: 639–647
- 135 Kong N, Tai Y W, Shin J S. A physically-based approach to reflection separation: from physical modeling to constrained optimization. IEEE Trans Pattern Anal Mach Intell, 2013, 36: 209–221
- 136 Kajiyama S, Piao T, Kawahara R, et al. Separating partially-polarized diffuse and specular reflection components under unpolarized light sources. In: Proceedings of the IEEE/CVF Winter Conference on Applications of Computer Vision, Waikoloa, 2023. 2549–2558
- 137 Wieschollek P, Gallo O, Gu J, et al. Separating reflection and transmission images in the wild. In: Proceedings of the European Conference on Computer Vision, Munich, 2018. 89–104
- 138 Lei C, Huang X, Zhang M, et al. Polarized reflection removal with perfect alignment in the wild. In: Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Seattle, 2020. 1750–1758
- 139 Li R, Qiu S, Zang G, et al. Reflection separation via multi-bounce polarization state tracing. In: Proceedings of the 16th European Conference, Glasgow, 2020. 781–796
- 140 Lyu Y, Cui Z, Li S, et al. Physics-guided reflection separation from a pair of unpolarized and polarized images. IEEE Trans Pattern Anal Mach Intell, 2023, 45: 2151–2165
- 141 Pomozi I, Horváth G, Wehner R. How the clear-sky angle of polarization pattern continues underneath clouds: full-sky measurements and implications for animal orientation. J Exp Biol, 2001, 204: 2933–2942
- 142 Hegedüs R, Åkesson S, Horváth G. Polarization patterns of thick clouds: overcast skies have distribution of the angle of polarization similar to that of clear skies. J Opt Soc Am A, 2007, 24: 2347
- 143 Hegedüs R, Åkesson S, Wehner R, et al. Could Vikings have navigated under foggy and cloudy conditions by skylight polarization? On the atmospheric optical prerequisites of polarimetric Viking navigation under foggy and cloudy skies. In: Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 2007. 1081–1095
- 144 Suhai B, Horváth G. How well does the Rayleigh model describe the E-vector distribution of skylight in clear and cloudy conditions? A full-sky polarimetric study. J Opt Soc Am A, 2004, 21: 1669–1676
- 145 Chu J K, Chen W J, Wang H Q, et al. Mobile robot navigation tests with polarization sensors. Opt Precis, 2011, 19: 2419–2426 [褚金奎, 陈文静, 王洪青, 等. 基于偏振光传感器的移动机器人导航实验. 光学精密工程, 2011, 19: 2419–2426]
- 146 Wang Y, Chu J, Zhang R, et al. A novel autonomous real-time position method based on polarized light and geomagnetic field. Sci Rep, 2015, 5: 9725
- 147 Chu J K, Zhang H X, Wang Y L, et al. Design and construction of autonomous real-time position prototype based on multi-polarized skylight. Opt Precis, 2017, 25: 312–318 [褚金奎, 张慧霞, 王寅龙, 等. 多方向偏振光实时定位样 机的设计与搭建. 光学精密工程, 2017, 25: 312–318]
- 148 Liang J, Yan H, Tang J. Design and application of three channel polarization imaging navigation sensor. Sci Technol Eng, 2017, 17: 52–56
- 149 Wang Z, Chu J, Zhang Y, et al. Design of an integrated polarization band-pass filter. Proc Inst Mech Eng, 2013, 227: 120–124
- 150 Chu J K, Wang Z W, Guan L, et al. Integrated polarization dependent photodetector and its application for polarization navigation. IEEE Photon Technol Lett, 2014, 26: 469–472
- 151 Liu Z, Zhang R, Wang Z, et al. Integrated polarization-dependent sensor for autonomous navigation. J Micro Nanolith MEMS MOEMS, 2015, 14: 015001
- 152 Rasti B, Ghamisi P. Remote sensing image classification using subspace sensor fusion. Inf Fusion, 2020, 64: 121–130
- 153 Bazo R, Reis E, Seewald L A, et al. Baptizo: a sensor fusion based model for tracking the identity of human poses. Inf Fusion, 2020, 62: 1–13
- $154 \quad \text{Zhao Y, Yi C, Kong S G, et al. 3D reconstruction and dehazing with polarization vision. In: Multi-band Polarization}$

Imaging and Applications. Berlin: Springer, 2016. 177–194

- 155 Zhong F, Kumar R, Quan C. RGB laser speckles based 3D profilometry. Appl Phys Lett, 2019, 114: 201104
- 156 Cui Z, Gu J, Shi B, et al. Polarimetric multi-view stereo. In: Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2017. 1558–1567
- 157 Ma J, Zhao J, Jiang J, et al. Locality preserving matching. Int J Comput Vis, 2019, 127: 512–531
- 158 Hao J L, Zhao Y Q, Zhao H M, et al. 3D reconstruction of high-reflective and textureless targets based on multispectral polarization and machine vision. Acta Geod et Cartographica Sin, 2018, 47: 816
- 159 Zhou Z, Wu Z, Tan P. Multi-view photometric stereo with spatially varying isotropic materials. In: Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Portland, 2013. 1482–1489
- 160 Atkinson G A, Hancock E R. Recovery of surface orientation from diffuse polarization. IEEE Trans Image Process, 2006, 15: 1653–1664
- 161 Atkinson G A, Hancock E R. Shape estimation using polarization and shading from two views. IEEE Trans Pattern Anal Mach Intell, 2007, 29: 2001–2017
- 162 Mahmoud A H, El-Melegy M T, Farag A A. Direct method for shape recovery from polarization and shading. In: Proceedings of the 19th IEEE International Conference on Image Processing, orlando, 2012. 1769–1772
- 163 Klinker G J, Shafer S A, Kanade T. Using a color reflection model to separate highlights from object color. IEEE Trans Pattern Anal Machine Intell, 2004, 26: 639–647
- 164 Lei C, Qi C, Xie J, et al. Shape from polarization for complex scenes in the wild. In: Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, New Orleans, 2022. 12632–12641
- 165 Miyazaki D, Kagesawa M, Ikeuchi K. Transparent surface modeling from a pair of polarization images. In: Proceedings of the IEEE 1st International Conference on Computer Vision (ICCV), 1987. 145–150
- 166 Atkinson G A. Polarisation photometric stereo. Comput Vision Image Underst, 2017, 160: 158-167
- 167 Smith W A P, Ramamoorthi R, Tozza S. Height-from-polarisation with unknown lighting or albedo. IEEE Trans Pattern Anal Mach Intell, 2018, 41: 2875–2888
- 168 Kadambi A, Taamazyan V, Shi B, et al. Polarized 3D: high-quality depth sensing with polarization cues. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision, Santiago, 2015. 3370–3378
- 169 Fukao Y, Kawahara R, Nobuhara S, et al. Polarimetric normal stereo. In: Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Kuala Lumpur, 2021. 682–690
- 170 Zhu D, Smith W A P. Depth from a polarisation+RGB stereo pair. In: Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Los Angeles, 2019. 7586–7595
- 171 Cui Z, Gu J, Shi B, et al. Polarimetric multi-view stereo. In: Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Honolulu, 2017. 1558–1567
- 172 Ba Y, Gilbert A, Wang F, et al. Deep shape from polarization. In: Proceedings of the 16th European Conference, Glasgow, 2020. 554–571

Polarization vision

Yongqiang ZHAO^{1*}, Xinbo QIAO¹, Ning LI² & Quan PAN¹

1. Department of Automation, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;

2. Department of Automation, Tsinghua University, Beijing, 100084, China

* Corresponding author. E-mail: zhaoyq@nwpu.edu.cn

Abstract Traditional vision techniques have been widely used in various fields. However, when facing complex environments and non-cooperative targets, the limited information obtained renders traditional vision techniques ineffective in detecting and recognizing targets. As a basic physical property of light, polarization, alongside intensity, wavelength, and phase, can reflect the vibrational characteristics of emitted or reflected light and characterize multiple aspects of objects. Therefore, polarization information can effectively distinguish targets from backgrounds and maintain information validity in adverse environments. Researchers have introduced polarization information into the vision technique and obtained a solution to the imaging problem in complex scenes, namely polarization vision. Polarization vision was first discovered in some animals, and further research on polarization vision has revealed its imaging advantages over traditional vision in complex scenes. This review focuses on the development of polarization vision, polarization imaging devices, and their applications. We also look ahead to the future development direction of polarization vision and related technologies.

Keywords polarization vision, polarization information, polarization imager, scattering medium imaging, object detection, specularity removal, 3D reconstruction