

小型高光谱图谱仪与激光雷达及其海洋应用

何赛灵^{1,2}, 陈祥¹, 李硕¹, 姚辛励^{1,2}, 徐展鹏¹

(1. 国家光学仪器工程研究中心 浙江大学光及电磁波研究中心, 浙江 杭州 310058;
2. 浙江大学 宁波研究院, 浙江 宁波 315100)

摘要: 海洋是地球生态环境的重要一环, 但人类对海洋资源的勘探和开采容易对其造成严重破坏, 如油气开采过程造成的大面积溢油、污染和赤潮爆发等。高光谱成像技术可以同时获取图像信息与高分辨光谱信息, 在海洋原位探测上具有重大应用。文中综述了小型高光谱图谱仪与激光雷达及其在海洋应用上的部分近期工作。小型高光谱图谱仪结合荧光技术, 实现了溢油种类的分类和油膜厚度的估计。多模式高光谱海洋原位探测系统可以工作于普通反射或透射成像、望远成像、显微成像三种模式, 实现了海洋不同藻类及鱼类传染病载体孢囊的高光谱探测。高光谱技术结合激光雷达技术在溢油、赤潮等海洋污染物监测方面具有很大潜力。非弹性高光谱沙姆激光雷达系统通过油品的荧光光谱实现了海洋溢油油品的遥测鉴别。形貌沙姆激光雷达系统基于二维沙姆成像原理, 通过空气-水界面折射矫正, 成功的对人体、贝壳、珊瑚等进行了三维形貌重构, 近处恢复精度可达毫米级, 表面纹路清晰可见, 为海洋监测应用提供了新的技术支持。

关键词: 高光谱图谱仪; 沙姆激光雷达系统; 沙姆成像原理; 溢油; 赤潮; 海洋原位探测; 三维形貌

中图分类号: TN959.72 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA202049.0203001

Small hyperspectral imagers and lidars and their marine applications

He Sailing^{1,2}, Chen Xiang¹, Li Shuo¹, Yao Xinli^{1,2}, Xu Zhanpeng¹

(1. Zhejiang University Centre for Optical and Electromagnetic Research, National Engineering Research Center for Optical Instruments, Hangzhou 310058, China; 2. Ningbo Research Institute, Zhejiang University, Ningbo 315100, China)

Abstract: Ocean is an important part of the earth's ecological environment. Exploration and exploitation of marine resources may easily cause serious damage to ocean, such as large-scale oil spill, pollution and red tide caused by oil and gas exploitation. Hyperspectral imaging technology can obtain both image information and spectral information at the same time, and has important applications in marine in-situ detection. In this paper, some recent works about hyperspectral imagers are reviewed, including a small-scale hyperspectral imager combined with fluorescence technology for the classification of oil spills and the estimation of oil film thickness, a multi-mode hyperspectral marine in-situ detection system (in three

收稿日期: 2019-11-05; 修订日期: 2019-12-03

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFC1407503)

作者简介: 何赛灵(1966-), 男, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事亚波长光子学、光传感与通讯等方面的研究。Email: sailing@zju.edu.cn

modes: common reflection or transmission imaging, telescopic imaging and microscopic imaging) for hyperspectral detection of different algae and spores of some fish infectious disease carriers. Hyperspectral technology combined with lidar technology has great potential in monitoring oil spill, red tide and other marine pollutants. An inelastic hyperspectral Scheimpflug lidar system and a ligh-sheet Scheimpflug lidar system are also reviewed. The former is for the type identification of oil spills through the fluorescence spectrum of oil spills, and the latter is for the detection of the 3D shapes of some manikin, shells and corals with the refraction correction at the air-water interface.

Key words: hyperspectral imager; Scheimpflug lidar system; Scheimpflug imaging principle; oil spill; red tide; marine in-situ detection; 3D shape

0 引言

海洋约占了地球表面积的 71%，蕴藏了丰富的生物资源、矿藏、油气资源等。人类对海洋资源的勘探和开采容易对其造成严重破坏，如油气开采过程造成的大面积溢油、污染和赤潮爆发等，对海洋生态环境、沿海养殖产业等造成严重的危害，并造成重大经济损失。

针对海上溢油的监测，遥感是目前最有效可靠的手段之一^[1]，主要有被动遥感技术和主动遥感技术。被动遥感技术主要有可见光遥感、红外遥感等，主动遥感技术有微波遥感、激光荧光遥感等^[2]。可见光遥感主要根据油膜和海水对可见光不同的反射特性来进行检测，严重依赖太阳辐射，无法在夜间工作^[3]。虽然可见光高光谱利用更加细分的谱段提高了溢油鉴别能力^[4-6]，但还是受环境影响较大，数据获取较难，目前的研究多是在实验室内进行；热红外技术根据溢油吸收太阳辐射后温度与海水不同来实现溢油的探测，但易受天然物体（沉积物、有机物等）的干扰，而且只能估算厚油膜的大致厚度，对薄油膜没有很好的效果^[2,7-8]；微波遥感主要利用合成孔径雷达(SAR)的遥感数据，但易受生物油膜、云雨层的类油膜信息的干扰，且无法有效估算油膜厚度^[9-10]；激光荧光遥感基于溢油中某些成分在蓝紫光的激光照射下会产生激光荧光和拉曼效应来鉴别分类油品，估算油膜厚度，而且由于其独特的荧光信号，可以很好的与其他杂物区分开，是目前较为有效的溢油监测手段，但激光荧光雷达往往体积较大、不易携带、成本较高^[7,11]。高光谱技术和激光荧光遥感结合，

可以有效减小其他杂物的干扰，提高溢油的鉴别能力和油膜厚度估算能力^[12]。文中介绍的笔者研发的小型荧光高光谱成像系统^[13]和非弹性高光谱沙姆激光雷达系统^[14]分别利用 405 nm 和 446 nm 的激光激发油品荧光并结合高光谱技术，实现了油品的鉴别分类和油膜厚度估算。

除了由于人类活动引发的溢油事故，赤潮等灾害也会对海洋生态环境造成严重危害，甚至会影响沿海核电站的取水系统，进而影响核电站正常工作^[15]。遥感也是监测赤潮的有效手段，前面所述用于溢油的监测手段大部分都能应用于赤潮的监测。例如 Stumpf 等使用 SeaWiFS 卫星的彩色图像和原位数据开展了对墨西哥湾的有害藻华(HABs)进行了监测研究^[16]，但卫星遥感易受云层干扰，且采样频率低。赤潮爆发期间，由于浮游植物的大量繁殖，而浮游植物体内含有叶绿素，在激光的激发下，叶绿素呈现荧光特性(685 nm 附近)，这使得高光谱和激光荧光在赤潮监测有独特的优势，基于荧光光谱可以观测浮游植物群落的空间分布和生理状态等^[17-18]。笔者的荧光高光谱成像系统和非弹性高光谱沙姆激光雷达系统利用荧光遥感和高光谱技术，在监测浮游动植物具有很大的潜力。多模式高光谱海洋原位探测系统可以对多种致灾藻类及其在海洋底部的孢囊等进行探测。

此外，海洋中的珊瑚礁生态系统被称为“海底热带雨林”，栖息了 1/4 以上的海洋鱼类，物种极其丰富。激光雷达三维重构技术可以通过对珊瑚礁进行三维形貌重构，辅助分析珊瑚的生长状态。笔者的沙姆激光形貌系统对人体、贝壳和珊瑚等进行了三维形貌重构^[19-20]，在近处的恢复精度可达毫米级，该项

技术还有望应用于海底地形的形貌探测。

1 小型高光谱成像系统

笔者的高光谱成像技术结合了高光谱探测和成像技术,通过推扫方式可以获取目标的二维空间信息的同时,还能获取对应的一维高光谱信息,形成目标的三维数据立方。

针对成像光谱仪的分光器件,光栅相比棱镜有线性色散、色散能力强等优点,但常规的光栅分光后,后续的光学系统需要偏折角度,增大了加工的难度。棱镜-光栅-棱镜(Prism-Grating-Prism, PGP)的光路结构,可以使光路共轴,方便调试,且能一定程度减小系统的谱线弯曲情况^[21]。

PGP 结构的成像光谱仪光路图如图 1 所示,从左到右依次为狭缝、准直透镜、PGP 分光模块,聚焦透镜,光谱面(探测器)。成像镜头(图中未画出)将目标成像于狭缝上(即入瞳),狭缝上只允许一条线区域的像通过,随后被准直透镜准直为平行光,入射到 PGP 结构的第一块楔形棱镜之上。楔形棱镜将光路偏折一定角度后入射于光栅上,光栅分光后再透过第二块楔形棱镜,将一级衍射的中心波长偏折回光轴,实现光路共轴。最后经过聚焦透镜,将不同波长(角度)的光聚焦于光谱面不同的位置,实现分光。

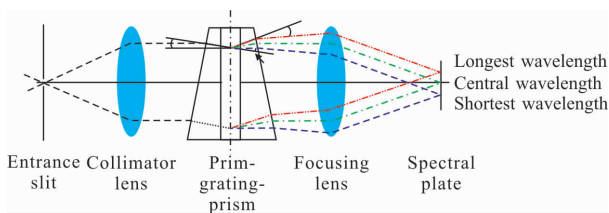


图 1 PGP 成像光谱仪光路示意图

Fig.1 Optical path of the PGP imaging spectrometer

1.1 笔式成像光谱仪

基于 PGP 的分光结构,海南大学的蔡夫鸿和浙江大学的何赛灵团队开发了一种手持的、智能手机连接的笔式成像光谱仪(Pencil Like Imaging Spectrometer, PLIS),先后被 OSA 和 Photonics NEWS 报道。该笔式成像光谱仪原型为一个高通量、无线、低成本、便携的光学传感平台,重 140 g,直径 3.1 cm,长 15.5 cm,使用无线智能相机作为探测模块。该笔式成像光谱仪采用白色 LED 阵列灯作为光源,可以像用铅笔一

样对待测物体进行光谱成像操作,光谱分辨率可达 17 nm,光谱范围为 400~675 nm,其结构及扫描方式如图 2 所示。笔者使用该笔式成像光谱仪对香蕉、猪肉和人手进行了光谱分析,其可以像铅笔一样拿在手里对物体进行扫描,光源采用白色 LED 阵列灯,以 45°角对物体进行照明;物体(以人手为例)上的线状区域(黑点虚线表示)反射的光进入系统,在 CMOS 芯片上产生光谱图像,图中左侧为测得的皮肤反射率光谱^[22]。

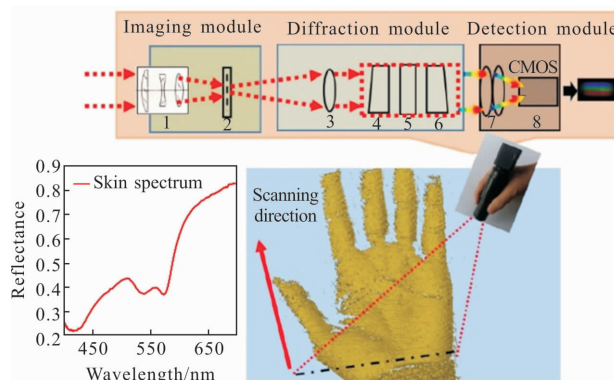


图 2 笔式成像光谱仪的示意图

Fig.2 Schematic illustration of the pencil-like imaging spectrometer

基于所得光谱结果,可检测香蕉成熟程度、猪肉中的肌红蛋白以及人手中的血红蛋白含量。通过使用成像光谱仪对待测样品的手动扫描,在 16 s 内可得到高信噪比的三维光谱图像数据立方体,与商用便携式成像光谱仪相比,笔式成像光谱仪系统成本较低(价格不到 300 美元)^[22]。

随后,笔者对上述笔式成像光谱仪进行改进,进一步将其减重为 35 g,光谱分辨率优化至 7 nm,并且成功地将这种新型便携式成像光谱仪与自拍杆、水下防水罩和无人机相结合,进行了遥感实验。如图 3 所示,为采用该笔式成像光谱仪对海洋致灾生物或海洋垃圾进行了高光谱成像,可以根据光谱信息判断其种类。图 3(g)~(h)为船载该系统,在航行过程中拍摄防城港核电站的水体及远处景物的高光谱图像及其光谱,可以检测到水体中藻类的叶绿素吸收峰,通过这些数据,可以进一步分析得到水体中藻类生长情况,为藻类爆发提供预报信息。

这种便携式成像光谱仪可在日常生活中获得较为准确的光谱图像,这也验证了在未来没有科学级仪器的帮助下,便携式遥感的工作潜力^[23]。

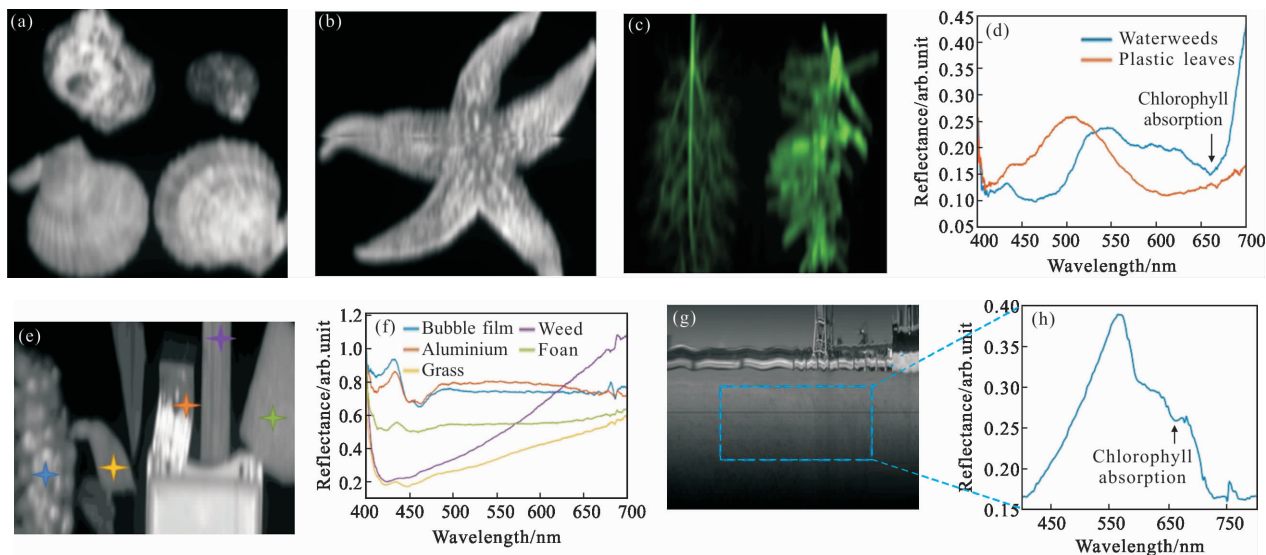


图 3 (a) 贝壳、海螺等高光谱图像; (b) 海星高光谱图像; (c) 塑料水草与真水草高光谱图像(伪彩色处理); (d) 塑料水草与真水草反射率光谱比较; (e) 海洋垃圾高光谱图像; (f) 海洋垃圾反射率光谱; (g) 防城港水体及远处景物高光谱图像; (h) 防城港水体反射率光谱

Fig.3 (a) Hyperspectral images of shells, conches, etc; (b) hyperspectral images of starfish; (c) hyperspectral images of plastic and real aquatic plants (after pseudo color processing); (d) reflectance spectra of plastic and real aquatic plants; (e) hyperspectral images of various marine garbage; (f) reflectance spectra of various marine garbage; (g) hyperspectral images of water body and distant scenery at a harbor; (h) reflectance spectrum of the water body at a harbor

1.2 荧光高光谱成像系统

荧光高光谱成像被广泛应用于生物学、食品安全和质量检测、医学等领域。一般来说,由于量子效率较高,荧光信号更容易被光源激发并被光电探测器检测到,从而能够降低检测系统的成本。笔者研发了一种基于 PGP 分光的快速高光谱扫描荧光成像系统,光谱范围为 365~810 nm,光谱分辨率可达 1 nm,一次快照可以在 100 ms 内获得线性区域的空间和荧光光谱信息,通过对电动线性工作台的扫描,可以得到样品的荧光超立方体,其结构如图 4 所示。利用

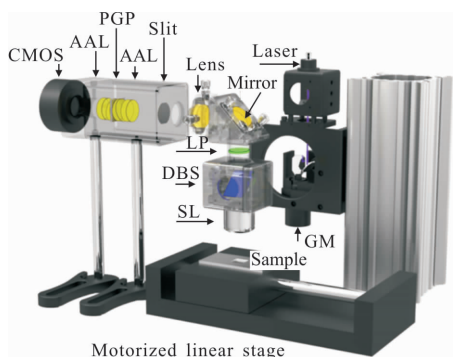


图 4 线扫描荧光成像系统原理图^[24]

Fig.4 Schematic diagram of the line-scanning fluorescence imaging system^[24]

405 nm 的激发光激发样品荧光,通过对所获取的荧光超立方体进行处理分析,成功实现了奶粉中香兰素的定量分析,验证了荧光高光谱定量鉴别粉末的可行性^[24]。

随后,笔者自主设计机械结构,对荧光高光谱成像系统进一步改进与简化,采用了线光源代替振镜扫描,集成性地研发出了第一代荧光高光谱成像系统工程样机,如图 5 所示,图中,1 为成像光谱仪,2 为电动直线滑台,3 为样品槽,4 为线激光,5 为样品槽,6 为分光镜,7 为宽带滤波片,8 为透镜,9 为狭

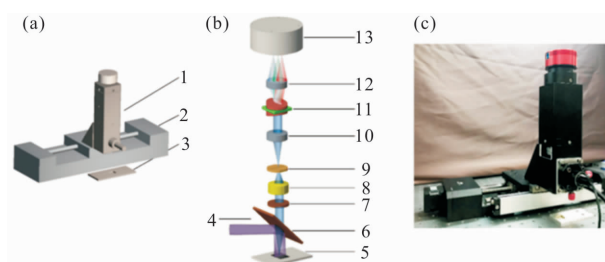


图 5 (a) 荧光高光谱检测系统示意图; (b) 高光谱探测系统的光路示意图; (c) 笔者的高光谱探测系统实物图^[13]

Fig.5 (a) Schematic of the fluorescent hyperspectral detection system; (b) optical layout of the hyperspectral detection system; (c) a photo of our hyperspectral detection system^[13]

缝,10 为非球面消色差镜头,11 为 PGP 分光原件,12 为非球面消色差透镜,13 为区域阵列互补金属氧化物半导体(CMOS)相机;该系统结构紧凑,体积小,易于搭载在位移平台等设备上^[13]。

图 6 中, 笔者的系统使用功率为 200 mW 的

405 nm 线激光器作为激发源激发来自样品槽中不同油品的荧光信号,以获取油品的荧光光谱信息。通过对三种原油及其混合物的荧光光谱进行主成分分析,实现了三种原油的鉴别分类,并进一步研究了油膜厚度与荧光光谱强度之间的线性关系,其结果

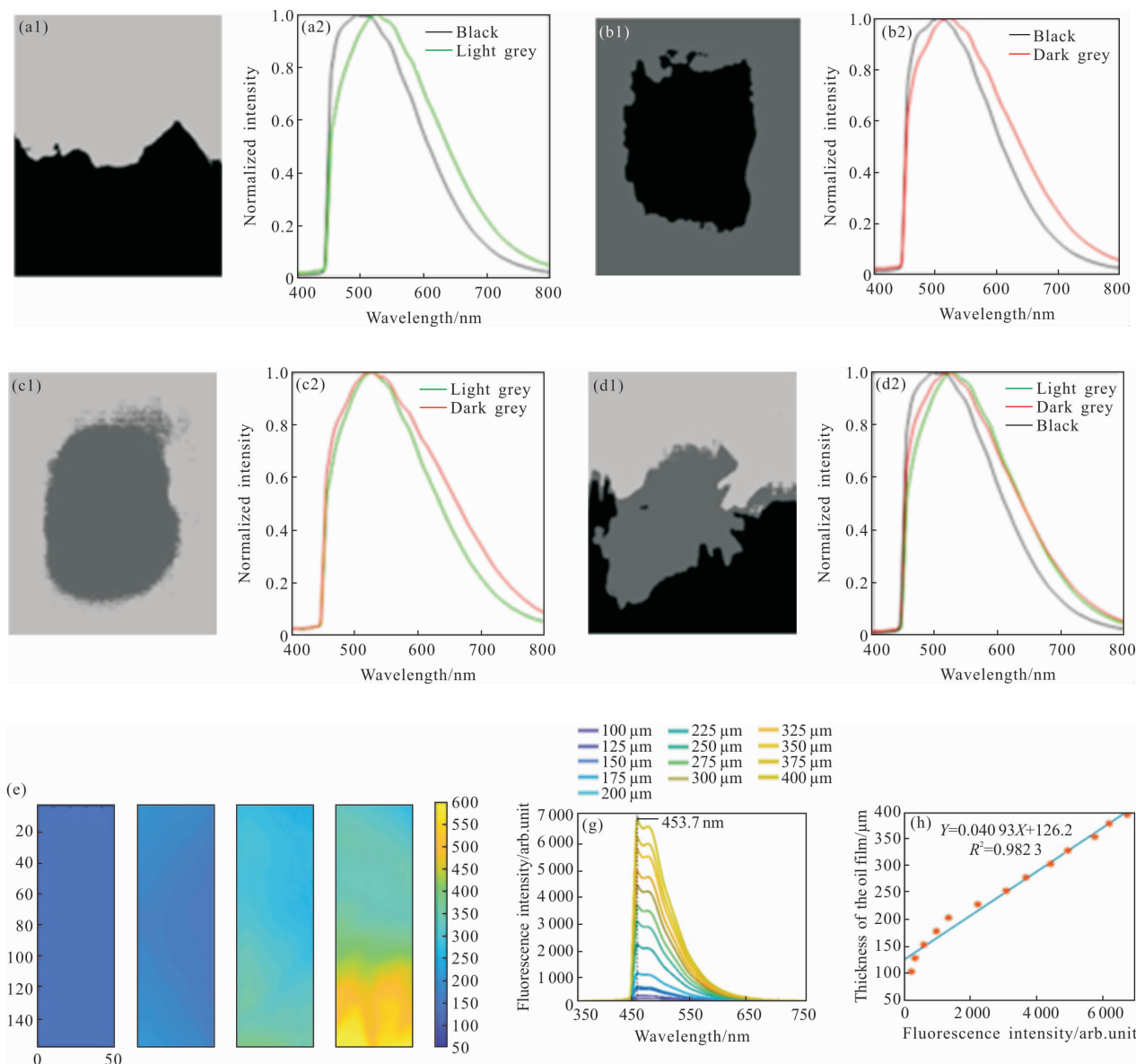


图 6 (a) 原油 1 和原油 2 混合样品在四个混合样品中原油的空间分布和不同区域的平均光谱的成像(伪彩色);(b) 原油 1 和原油 3 的混合样品;(c) 原油 2 和原油 3 的混合样品;(d) 原油 1、2、3 的混合样品;(e) 平均厚度为 100、200、300、400 μm 的油的厚度分布;(f) 不同厚度油膜的光谱;(g) 油膜厚度与光谱峰的荧光强度的拟合曲线^[13]

Fig.6 Imaging (pseudo color) of the spatial distribution of crude oils in four mixed samples and the average spectra at different regions for (a) a mixed sample of crude oil 1 and crude oil 2; (b) a mixed sample of crude oil 1 and crude oil 3; (c) a mixed sample of crude oil 2 and crude oil 3; and (d) a mixed sample of crude oil 1, crude oil 2, and crude oil 3; (e) distributions of the thicknesses of oil with average thicknesses of 100, 200, 300, 400 μm ; (f) spectra for the oil films of different thicknesses; (g) fitting curve of the thickness of the oil film and the fluorescence peak intensity^[13]

证明了利用荧光数据定量测量油膜厚度的可行性。

1.3 多模式高光谱海洋原位探测系统

笔者在 1.2 节的荧光高光谱成像系统的基础上,对其进一步进行了改进与防水封装,搭建了多模式高光谱探测系统,并将其应用到了海洋生物的探测中。多模式是指该系统可以工作在普通(反射或透射)成像、望远成像和显微成像三种工作模式下。

图 7(a)为经过防水封装的水下高光谱成像系统,外壳采用氧化发黑的铝合金材料,钢化玻璃作为光学窗口,外壳留有接口,接口采用军工级金属防水 USB 插头,具备 IP67 级防水水平,至少可以在水中

防水 24 h 以上。图 7(b)为对五种不同的藻类进行高光谱探测得到光谱信息,其在 670 nm 左右都有叶绿素的吸收峰,莱茵衣藻由于浓度较低,吸收峰不明显。角毛藻偏黄,在 600~650 nm 反射较高;小球藻偏绿,在 500~600 nm 反射偏高。棕囊藻与角毛藻比较类似,较难直接分辨,但与其他三种在谱线上有明显区别。图 7(c)~(d)为对五种藻类的谱线经过 PCA 处理后得到的结果。由图 7(c)可以得到,经过主成分分析处理后,根据 PC1 vs PC2,各藻有分类的潜力(棕囊藻完全可以与其他四种藻类区别开来),只是集胞和角毛比较难分类。但由图 7(d)可以得到,可根据

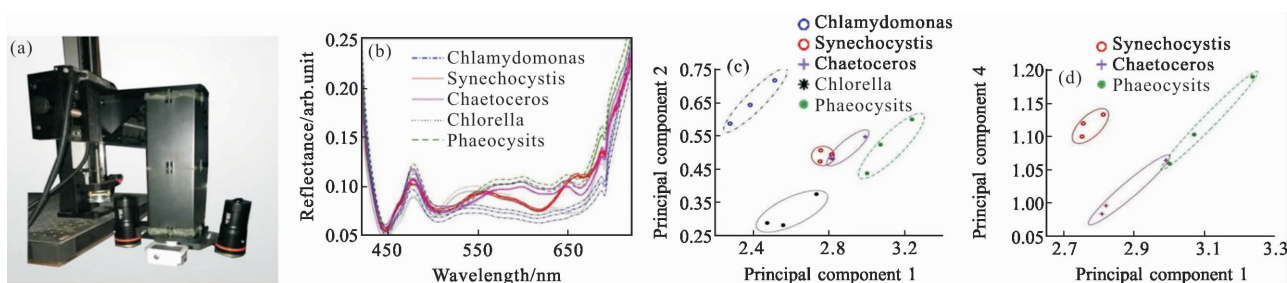


图 7 (a) 多模式海洋生物原位探测高光谱系统示意图;(b) 五种致灾藻类的反射率光谱;(c) 五种致灾藻类的反射率光谱经过 PCA 处理后的 PC1 vs PC2 图像;(d) 五种致灾藻类的反射率光谱经过 PCA 处理后的 PC1 vs PC4 图像

Fig.7 (a) Schematic diagram of multi-mode marine organisms in situ detection hyperspectral system; (b) reflectance spectra of five algae that may cause disaster; (c) PC1 vs PC2 image after PCA processing of reflectance spectra of five algae; (d) PC1 vs PC4 image after PCA processing of reflectance spectra of five algae

额外的 PC1 vs PC4 分开集胞和角毛这两种藻。

笔者的高光谱系统也可以结合常规的,消费级的望远镜进行成像。笔者将望远镜改造成高光谱望远镜,可以同时获得图像信息和光谱信息,如图 8(a)、

(b)所示。双筒望远镜的另一筒可以装配普通相机及激光测距仪,进行远距离测距。通过望远高光谱系统,可以应用与诸多遥感领域,如远处绿化率计算等。图 8(c)的成像在 1 km 以上的建筑物的望远高光谱图像,图 8(d)

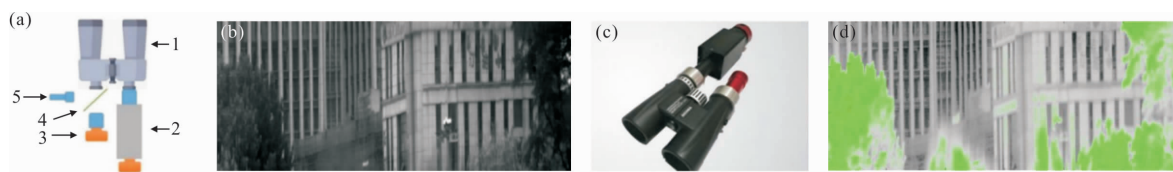


图 8 (a) 笔者的望远高光谱系统原理图;(b) 笔者的望远高光谱系统实物图;(c) 1 km 以上建筑物的望远高光谱图像;(d) 建筑物植物绿化率覆盖图

Fig.8 (a) Schematic diagram of our remote hyperspectral system; (b) physical diagram of our remote hyperspectral system; (c) remote hyperspectral image of buildings over 1 km; (d) estimated vegetation coverage map of the buildings

为由此估计出的建筑的植物绿化率覆盖图。

高光谱系统结合显微物镜可用于海洋微生物原位监测。开发了一种反射/透射两用显微高光谱成像系统,将宽带光源集成至探测光路中,保证照明与探

测同轴,有效避免了高倍率显微物镜距待测样品过近导致的外置光源无法照亮样品的问题。针对不同透明度的样品,该系统可自由切换照明模式,实现反射/透射高光谱图像的采集。刺激隐核虫病是海洋鱼

类常见重要的寄生虫病, 幼虫是激隐核虫世代发育的一个关键阶段, 直接侵染硬骨鱼类的皮肤和鳃, 一般没发育成幼虫的阶段叫孢囊, 发育成会游泳的幼虫叫孢子。目前笔者已经实现了对孢囊(刺激隐核虫)的显微高光谱成像, 可用于其体内物质成分分析。图 9(a)为 40 倍显微物镜下刺激隐核虫孢囊的高光谱图像; 如图 9(b)刺激隐核虫孢囊体内两位置及周边环境的光谱所示。今后还将扩展更多样品进行试验, 实现对浮游生物、致灾微藻等海洋微生物的原位监测。值得一提的是, 该系统还可以结合传像光纤, 伸入到海洋底泥中进行未萌发的藻类孢囊等的探测, 系统图如图 9(c)所示。

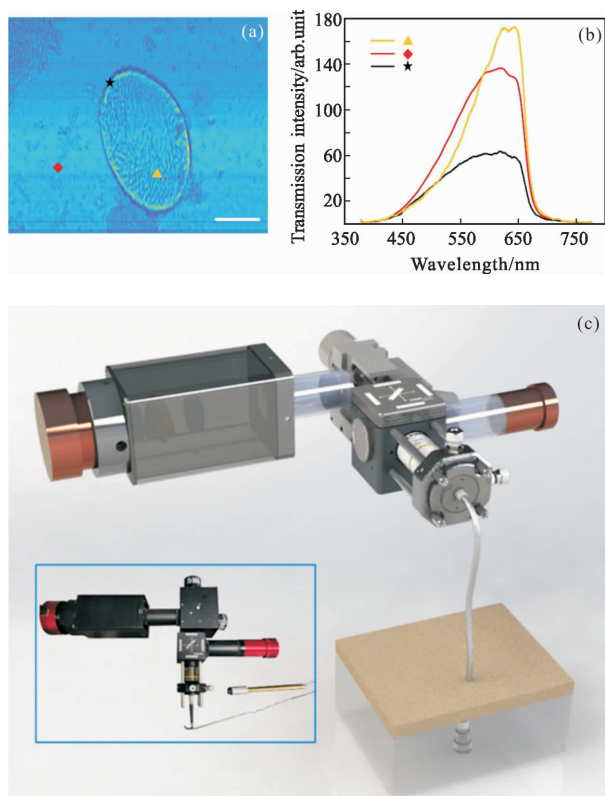


图 9 (a) 40 倍显微物镜下孢囊(海洋鱼类传染病载体刺激隐核虫)的高光谱图像(比例尺: 30 μm); (b) 孢囊体内两位置及周边环境的光谱; (c) 结合传像光纤的探测海底孢子/底泥孢囊的显微高光谱图谱系统

Fig.9 (a) Hyperspectral images of a spore (cryptocaryon irritans Brown) with a 40 \times microscope objective (scale bar: 30 μm); (b) spectra at two positions inside the spore and one position at its surroundings; (c) microscope hyperspectral imaging system for detecting spores at sea bottom through an image fiber

2 沙姆激光雷达系统

2.1 基本原理

沙姆激光雷达系统是沙姆成像原理的重要应用之一。沙姆成像原理是法国工程师 Jules Carpentier 在 1901 年申请的用于矫正视角的摄像放大机的英国专利中首次提出。后来, 奥地利陆军上尉 Theodor Scheimpflug 为了将自己的“透视绘图仪”用于航空摄影, 深入研究沙姆成像原理并成功将其应用于放大航空照片和陆地勘察照片时所进行的校正。以 Scheimpflug 命名的沙姆原理如图 10(a)所示, 具体描述为物平面、透镜平面以及像平面相交于一条直线, 这样可以得到全面清晰的像, 这个规则也被称为合页规则(Hinge Rule)。基于沙姆成像原理的沙姆相机(Scheimpflug Camera)目前已被应用于视网膜成像以进行眼科的临床应用^[25-26]、距离测量^[27]等领域。一般的, 可以使用大光圈在短曝光时间下对物体清晰成像, 但这无法避免会引起景深小的问题, 而当使用针孔相机时, 可以很轻松的解决景深问题, 但视野小、成像效率低、容易引起运动模糊。满足合页规则的沙姆原理使得在使用大光圈的成像透镜系统时理论上可以达到无穷远的景深, 对很大范围的物体都能清晰成像。

值得注意的是, 沙姆原理与镜头的焦距无关, 它需要满足合页规则来实现对焦。合页规则使得物平面、透镜平面和像平面不再平行, 而是存在一定的倾斜角, 且这三个面相交于一条直线。基于几何光学原理, 可以推导出满足合页规则下图像传感器像素与物体距离之间的关系为:

$$z = \frac{d[p_l(\sin\varphi - \cos\varphi\cot\theta) + v_0]}{p_l(\cos\varphi - \sin\varphi\cot\theta) + v_0\cot\theta} \quad (1)$$

式中: θ 为物平面与透镜平面之间的夹角; φ 为像平面与透镜平面之间的夹角; v_0 为像平面中心与透镜平面中心的距离; p_l 为像平面上图像传感器每个像素的位置, 即 $p_l = (N_p/2 - n_p)\omega_p$, 其中 N_p 为单列或单行的像素总个数, n_p 为每个像素对应图像传感器中心的位置, ω_p 为像素尺寸; d 为透镜与物平面的距离, 由成像公式计算可得:

$$v_0 = fd / (d - f\cos\theta) \quad (2)$$

θ 和 φ 关系可以根据三角关系得到:

$$\varphi = \arctan \frac{f\sin\theta}{d - f\cos\theta} \quad (3)$$

这样，基于沙姆原理的雷达系统的距离参数可以由 θ, f, d 和 p_l 等参数决定，而距离分辨率可以通过对公式(1)微分后得到：

$$dz = \frac{z^2 \sin\varphi (1 - \cot^2\theta)}{[p_l(\sin\varphi - \cos\varphi \cot\theta) + v_0]^2} dp_l \quad (4)$$

式中： dp_l 为相机的像素间距，对于相机来说，是一个常数，而对于一个系统， θ, f, d 参数是确定的，这样距离分辨率 dz 与 z^2 成正比。传统脉冲式激光雷达利用飞行时间法测距，其距离分辨率是一个常数，而基于沙姆原理的雷达系统的距离分辨率随距离的变化而变化，而且在近处具有较好的分辨率，远距离的分辨率则会变差。图 10(b)和(c)给出了 MATLAB 对系统距离分辨的仿真曲线，系统的参数分别为：望远镜焦距 f 为 55 mm，像素尺寸为 $5.86 \mu\text{m}$ ，像素数为 1216×1936 ，透镜与物平面距离 d 为 260 mm、夹角 θ 为 87° ，与像平面夹角 φ 约为 12° 。但像平面、透镜平面和物平面之间的夹角很难通过手动精准调节，在实验中往往是通过已知的目标物来进行距离校准。

笔者团队将一维沙姆成像原理扩展到二维，并

建立了二维沙姆原理的数学物理模型^[19]，如图 10(d)所示。图中， O 和 O' 分别为三维坐标系和透镜平面的原点； d 为物平面到透镜中心的距离； θ 为透镜平面与物平面的倾斜角； φ 为像平面与透镜平面的倾斜角。 MN 是物平面上的一条线， $M'N'$ 为 MN 在像平面所成的像，它满足透镜成像方程。

根据成像原理和三角关系，则可以得出 yz 平面的成像点(M')与物点(M)之间的关系， M' 的 x 坐标为 0， yz 坐标可由公式(5)和(6)计算所得：

$$M'_y = \frac{d(\cos\theta + z\sin\theta)}{d\cos\theta + z\sin\theta - f} \quad (5)$$

$$M'_z = \frac{-zf}{d\cos\theta + z\sin\theta - f} \quad (6)$$

物平面上的点 $N(x, 0, z)$ 成像在像平面上 N' ， N' 的 y 坐标和 z 坐标与 M' 相同， N' 的 x 坐标则可从相似三角关系计算得出：

$$N'_x = \frac{-xf}{d\cos\theta + z\sin\theta - f} \quad (7)$$

$$N'_y = \frac{d(\cos\theta + z\sin\theta)}{d\cos\theta + z\sin\theta - f} \quad (8)$$

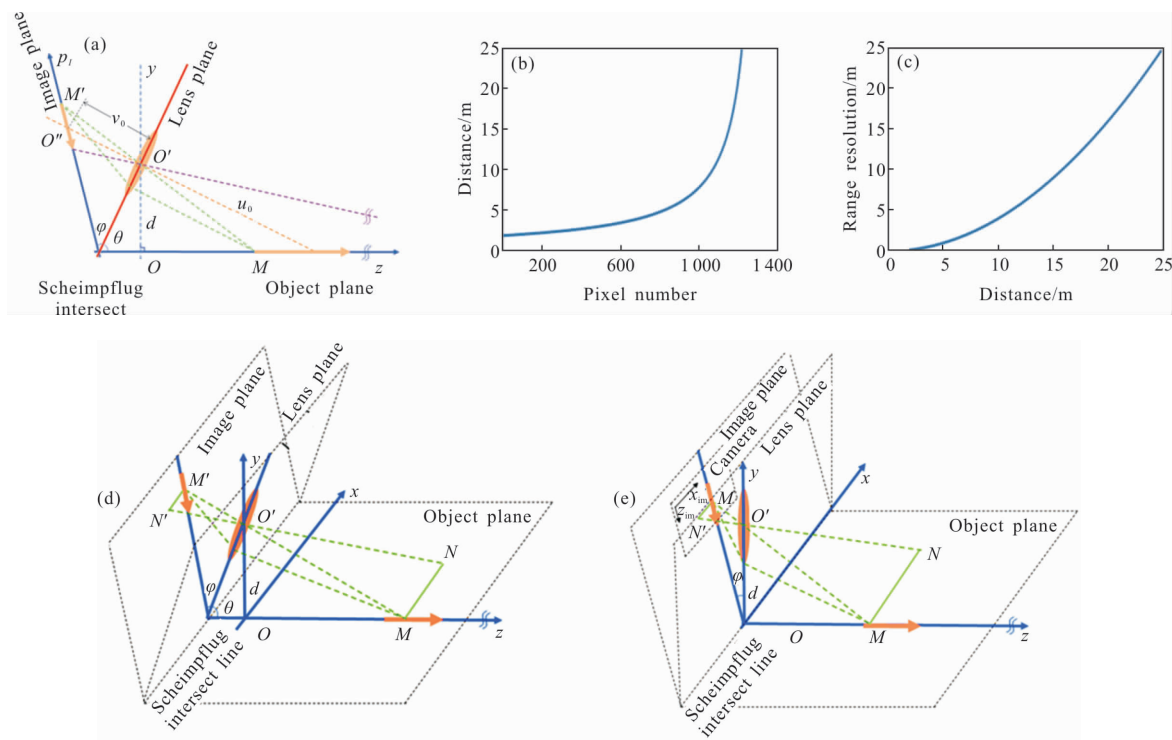


图 10 (a) 沙姆原理和合页规则光路示意图；(b) 图像传感器像素与物体距离之间的关系；(c) 距离分辨率与测量距离之间的关系；

(d) 二维沙姆原理光路示意图；(e) 当 $\theta=90^\circ$ 时图像坐标系和现实坐标系关系示意图

Fig.10 (a) Optical layout of the Scheimpflug principle and hingerule; (b) relationship between the image sensor pixels and object distance;

(c) relationship between the range resolution and the measurement distance; (d) optical layout of the 2D Scheimpflug principle;

(e) relationship between the image and the real-world coordinate system when $\theta=90^\circ$

$$N'_z = \frac{-zf}{d \cos \theta + z \sin \theta - f} \quad (9)$$

这样就得到了现实坐标系中的物点经过透镜成像后与像点的映射关系。一般的,基于沙姆原理的雷达系统的图像传感器用的是面阵的相机,所以需建立图像坐标系与现实坐标系的之间的数学关系。图 10(e)给出了当 $\theta=90^\circ$ 时图像坐标系和现实坐标系关系的示意图。在图像坐标系中,物体上的一点 N 在图像平面中的位置为 $N'(x_{im}, z_{im})$, 其中 x_{im} 和 z_{im} 分别是沿行和列方向的像素数。当 θ 为 90° 时,则实际物体点 N 的现实坐标系可以根据几何关系得到:

$$z = f \left(1 + \frac{\sqrt{f^2 + d^2}}{|M'O''| - (z_{im} - z_{im,M'})w_{col}} \right) \quad (10)$$

$$x = \frac{f-z}{f} (x_{im} - h_{row}/2)w_{row} \quad (11)$$

式中: $|M'O''|$ 为线段 $M'O''$ 的长度, 可通过已知的距离 $z_M(LOM)$ 计算得到; $z_{im,M'}$ 为 M' 在相机上的像素数; h_{row} 为沿行方向的总像素数; w_{col} 和 w_{row} 分别为沿列和行方向的像素大小。

2.2 空气-水界面的折射矫正

当基于沙姆原理搭建的激光雷达系统在岸上探测水下物体时,光束不可避免的要经过空气-水的交界面,从而产生折射现象,这将对物体在图像传感器的成像位置产生影响,使得系统对距离和高度的探测产生重大误差,因此需要对空气-水界面的折射进行矫正^[14,20]。

图 11(a)给出了沙姆原理在成像过程中经过空气-水的交界面后的距离矫正示意图。图中, O 是坐标系的起源; O' 是透镜的中心; $n=1$ 为空气的折射率; $n'=1.33$ 为水的折射率; P'' 是未考虑空气-水界面折射时物体未经矫正的位置; P 是物体在水中的实际位置; P' 是物体 P 在像平面的位置。则根据成像原理和三角函数关系可得矫正后的距离为:

$$z_{cor} = z_0 + (z - z_0) \frac{\tan \alpha_2}{\tan \alpha_1} \quad (12)$$

式中: z 为未经矫正的距离 (OP''); z_{cor} 为矫正后的距离 (OP); z_0 为透镜平面与空气-水界面之间的垂直距离 (OQ'); α_1 和 α_2 分别为入射光束和折射光束与空气-水界面的夹角。

图 11(b)给出了沙姆原理在成像过程中经过空气-水的交界面后的高度矫正示意图。其中 $M''N''$ 为未经矫正的在距离 z 处的物体高度; MN 为经矫正的

在距离 z_{cor} 处的实际物体高度; $M'N'$ 为实际物体高度 MN 在像面上的所成像的高度; K 为光束在空气-水界面处的折射点; F 为透镜的焦点; β_1 和 β_2 分别为入射光束和折射光束与 z 轴的夹角; α_1 和 α_2 分别是入射光束和折射光束与空气-水界面的夹角。同样的笔者也能得到矫正后的高度为:

$$x_{cor} = \frac{xz_0}{z} + (z_{cor} - z_0) \tan \beta_1 \quad (13)$$

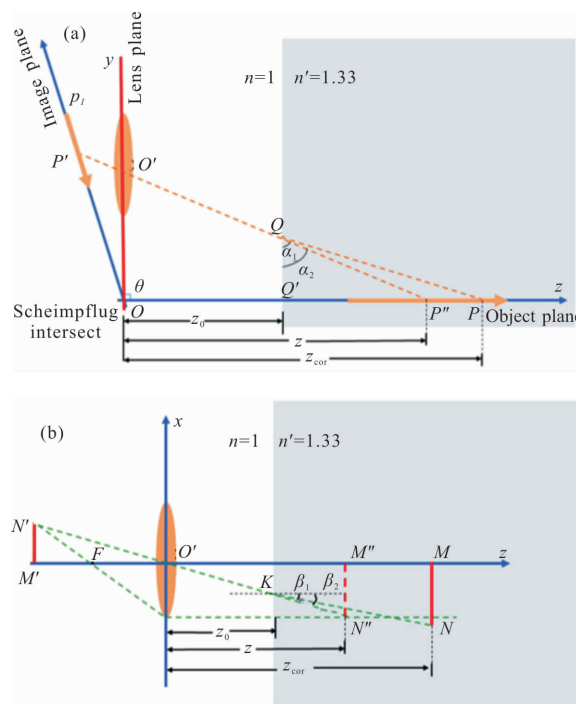


图 11 距离和高度矫正示意图

Fig.11 Optical layout of distance correction and height correction

2.3 非弹性高光谱沙姆激光雷达系统

非弹性高光谱沙姆激光雷达系统是将前面所述的高光谱成像系统和一维沙姆成像原理结合用于探测物质荧光光谱的新型雷达系统^[28]。不同的是,非弹性高光谱沙姆激光雷达系统中其狭缝需要倾斜一定角度以便于与成像透镜组主面和激光束三面相交,满足合页规则。这里的狭缝相当于沙姆原理里提到的图像传感器。后向的光信号经过狭缝后通过准直透镜准直,光源的弹性信号通过长通滤波片滤除,并通过棱镜-光栅-棱镜(PGP)结构分光,最终成像在与狭缝满足共轭条件的倾斜的面阵相机上,如图 12(a)所示,左上角小图给出了系统的光学结构, $L1$ 和 $L2$ 是两个准直透镜, OF 是长通滤波片, $P1$ 和 $P2$ 是两个对称的楔形棱镜, G 是可见光透射光栅; 华南师范

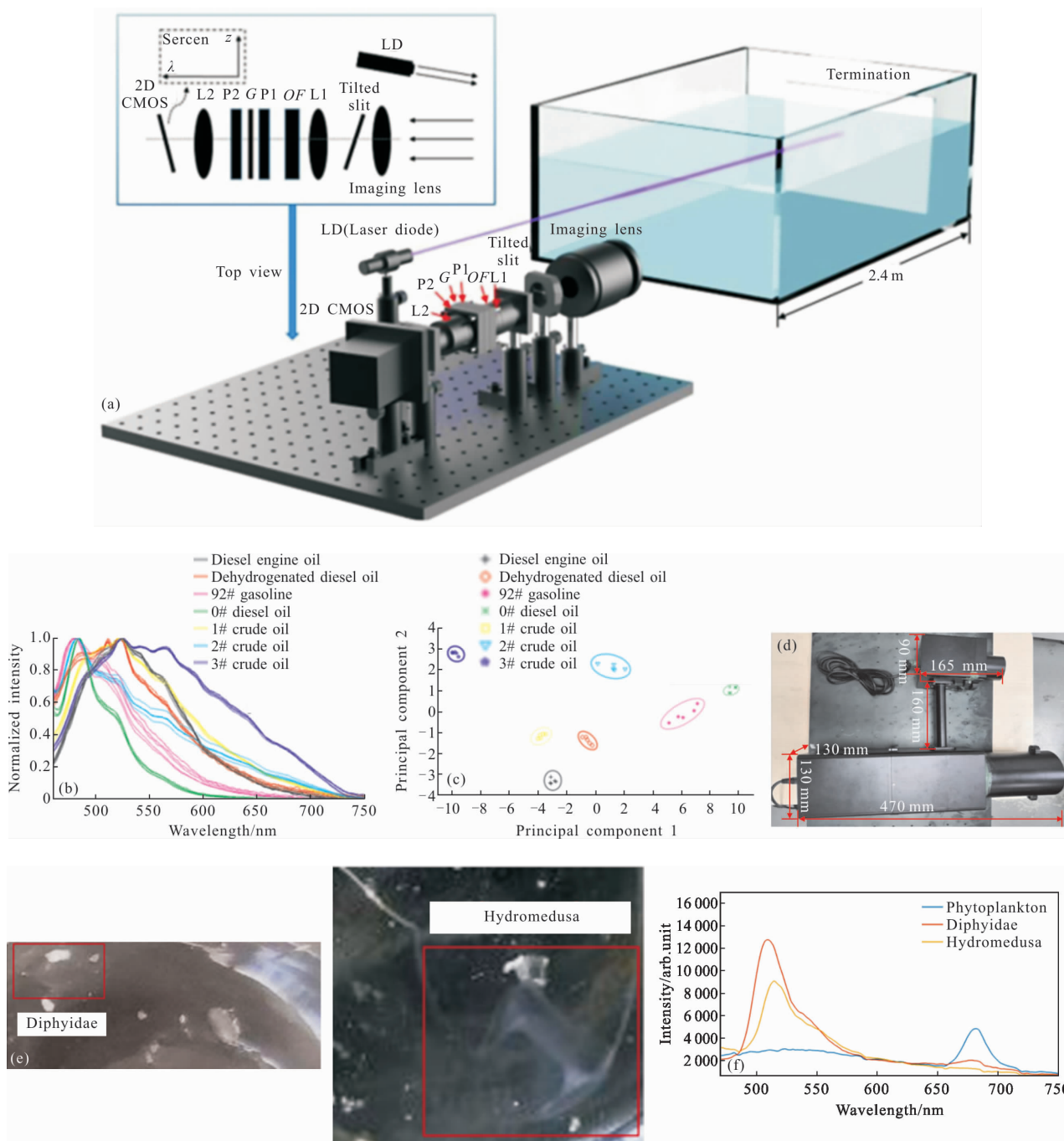


图 12 (a) 非弹性高光谱沙姆激光雷达系统。左上角小图给出了系统的光学结构, L1 和 L2 是两个准直透镜, OF 是长通滤波片, P1 和 P2 是两个对称的楔形棱镜, G 是可见光透射光栅; (b) 非弹性高光谱沙姆激光雷达系统识别油污: 七种油品的归一化光谱; (c) 七种油品的分类结果^[14]; (d) 非弹性高光谱沙姆激光雷达系统实验样机; (e) 双生水母和水螅水母的样品; (f) 浮游植物、双生水母、水螅水母的高光谱图

Fig.12 (a) Schematic diagram of the inelastic hyperspectral Scheimpflug lidar system; the figure on the top left corner is the optical layout of the system. L1 and L2 are collimated lenses, and OF is a long-pass optical filter. P1 and P2 are two symmetrical wedge prisms, and G is a transmission grating; (b) oil pollution discrimination by an inelastic hyperspectral Scheimpflug lidar system: Normalized spectra of seven kinds of oil samples; (c) classification results of seven kinds of oil samples^[14]; (d) experimental prototype of our inelastic hyperspectral Scheimpflug lidar system; (e) samples of diphyidae and hydromedusa; (f) hyperspectral for phytoplankton, diphyidae and hydromedusa

大学赵光宇等与瑞典隆德大学合作的非弹性高光谱沙姆激光雷达系统采用了直径 50 mm、焦距 200 mm 的双胶合消色差透镜,缝宽为 100 μm 的狭缝和每毫米 300 刻槽的光栅,激光器采用的是波长为 445 nm,功率为 1 W 的连续光激光二极管,实现了 430~700 nm 的光谱测量范围,具有 61 个光谱通道,光谱分辨率约为 5 nm,并成功在 5 m 的水箱中进行了测试^[28]。

非弹性高光谱沙姆激光雷达系统采用的是小型高功率的点状连续波(CW)激光二极管(LD),波段主要为蓝紫光。而过去 10 年,大功率蓝紫光的激光二极管得到快速发展,功率大幅提高的同时成本却降低了很多^[29]。该平均功率通常是以前的非弹性激光雷达可达到的平均功率的 30 倍。激光二极管的尺寸、重量、成本是脉冲固态激光器的千分之一,由此使得该系统十分小巧、轻便、低成本,而且易于搭载在无人机等平台上。值得一提的是,应用于海洋环境时,在可见光波段,400~450 nm 的谱段在水中吸收相对较小^[30],而且在生物成分(例如含叶绿素的浮游植物)、海面溢油(通常为紫光激发,目前也有向蓝紫光发展的趋势^[31])中诱导荧光的效率较高,400~450 nm 波段的光作为系统的激发光源是很合适的。

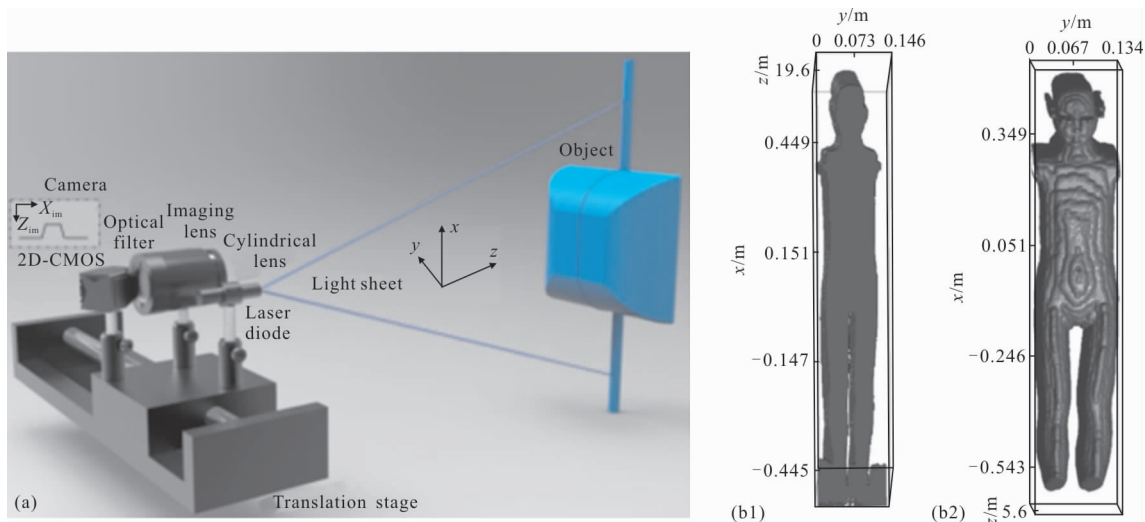
与基于飞行时间法(TOF)的高光谱激光雷达不同,满足合页规则的沙姆成像原理,不是通过飞行时间法实现测距,而是通过三角法进行测距,且理论上可以同时实现大光圈和无限的景深^[28]。而 TOF 的高光谱激光雷达往往需要大体积的固态激光器和集有雪崩光电二极管(APD)阵列模块光谱仪等,体积庞大,价格昂贵^[32]。

笔者团队利用直径直径 58 mm、焦距 55 mm 的成像镜头和缝宽为 50 μm 的狭缝,进一步提高了系统的光谱分辨率(优于 2nm)。并利用 1.5 W 的 446 nm 的商用蓝色激光二极管激发诱导油品的荧光光谱,通过主成分分析方法建立油品分类模型,成功实现了七种典型油品的定位和分类,图 12(b)和(c)分别给出了系统采集并处理后的七种油品的归一化光谱和分类结果^[14]。

笔者随后对非弹性高光谱沙姆激光雷达系统进行了机械结构和防水外壳的设计,自主搭建了第一代的实验样机,如图 12(d)所示。利用水平拖网和垂直拖网对大亚湾海域的浮游动植物进行了捕获,利用笔者搭建的实验样机对所捕获的浮游植物、双生水母、水螅水母样品进行了激发荧光探测,在 445 nm 波长的激发下,成功探测到浮游植物叶绿素 682 nm、双生水母 509 nm、水螅水母 515 nm 的激发荧光。

2.4 形貌沙姆激光雷达系统

形貌沙姆激光雷达系统是基于前言所述的二维沙姆成像原理,由浙江大学何赛灵团队等首次提出,并对塑料碗、棱形纸盒和人体模型进行了测量和三维重构,其重建结果在近距离的精度可达毫米级^[19]。与之前所述的沙姆激光雷达系统采用点状连续光激光二极管不同,沙姆激光形貌雷达采用的是 450 nm 的线光源,满足合页规则的成像镜头和二维图像传感器对物体进行成像,外部杂散光通过中心波长为 450 nm、带宽约为 18 nm 的带通滤波片滤除,系统搭载在位移平台上对目标进行连续采集,如图 13(a)所示。通过 MATLAB 程序对采集的图像进行处理后叠



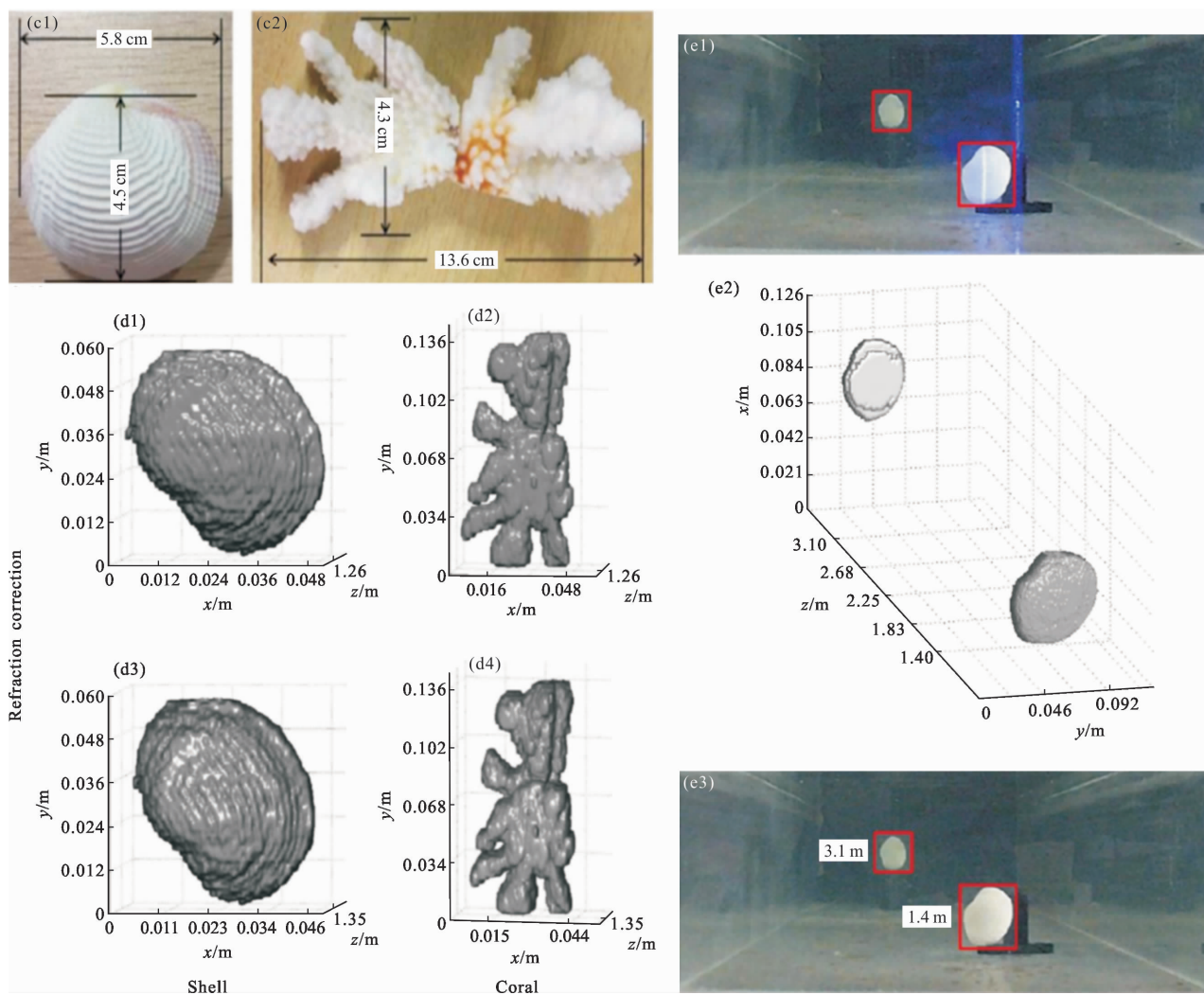


图 13 (a) 光面形貌沙姆激光雷达系统;(b) 人体模型分别在 19.6 m 处(b1)和 5.6 m 处(b2)的三维重构结果;(c) 贝壳和珊瑚的实物图;(d) 折射矫正前((d1)和(d2))与后((d3)和(d4))的贝壳和珊瑚的三维重构结果;(e) 数码相机观测到的实际水下环境的图片和三维重构结果对比图^[19-20]

Fig.13 (a) Light sheet-based Scheimpflug lidar system; (b) 3D reconstruction results of the manikin at 19.6 m (b1) and 5.6 m (b2); (c) photos of a shell and a coral; (d) 3D reconstruction results of the shell and coral with ((d1), (d2)) and without ((d3), (d4)) refraction correction; (e) comparison of pictures of actual underwater environment observed by digital camera and 3D reconstruction results^[19-20]

加, 可以将物体的三维轮廓信息恢复。值得一提的是, 为了保证系统的精度, 需要在对物体进行三维扫描前, 利用标定板对系统进行定标和校准。而由于沙姆成像原理的局限性, 其距离分辨率随着距离的平方而变差, 导致形貌沙姆激光雷达系统的恢复精度也被距离所限制, 近处恢复精度高, 远处恢复精度变差。如图 13(b)所示, 人体模型在 5.6 m 处的三维重构结果精度较高, 人体模型表面的纹路清晰可见, 然而在 19.6 m 处的三维重构结果只能看到人体模型的基本轮廓, 无法分辨表面的细节。

当该系统应用于水下时, 水和空气的折射率的不同会使得光束发生折射现象, 导致系统三维重构的精度下降, 因此, 笔者团队构建了空气-水界面折射的数学模型(图 11)^[20], 对距离和高度进行了矫正(公式(12)和(13)), 并对水下的贝壳和珊瑚进行了三维重构。图 13(c)给出了实际的贝壳和珊瑚的尺寸图, 贝壳的实际尺寸为 4.5 cm×5.8 cm, 厚度为 1.7 cm, 珊瑚的实际尺寸为 4.3 cm×13.6 cm, 厚度为 1.9 cm。图 13(d)是贝壳和珊瑚的三维重构结果, 上面两图是未经折射矫正的恢复结果, 恢复后的贝壳尺寸为

4.7 cm×5.8 cm, 厚度为 1.2 cm, 珊瑚尺寸为 4.5 cm×13.7 cm, 厚度为 1.6 cm; 下面两图是经折射矫正后的恢复结果, 恢复后的贝壳尺寸为 4.5 cm×5.8 cm, 厚度为 1.6 cm, 珊瑚尺寸为 4.3 cm×13.7 cm, 厚度为 2.0 cm。通过空气-水界面的折射矫正后, 其恢复的尺寸精度更高, 而且贝壳和珊瑚的表面的纹理也更加清楚。在此基础上笔者团队外加了一个数码相机用于观测水下的实际物体, 并与三维重构的结果进行对比。通过空气-水界面的折射矫正, 使得形貌沙姆激光雷达系统扩展了其应用范围, 例如可用于近海岸形貌测绘, 结合高光谱成像系统, 可以对珊瑚礁的生长态势进行监测、地质探测等。

3 结论

随着我国经济的快速发展, 我国对海洋资源的需求日益增长, 各类资源的勘探和开采规模也日趋壮大, 其过程不可避免的造成了严重的环境污染, 对海洋生态环境造成了不可忽视的破坏。文中提到的基于 PGP 结构的荧光高光谱成像系统和基于沙姆原理结合高光谱成像的非弹性高光谱沙姆激光雷达系统, 在高光谱技术的基础上, 结合激光荧光遥感技术, 在海洋溢油的油品鉴别、油膜厚度估算、浮游动植物的监测等方面具有很大的潜力。高光谱成像技术在获取常规的二维图像信息的同时还能获取到光谱信息, 笔者的小型高光谱成像系统对海洋中常见的贝壳、海螺、海星、水草以及一些海洋垃圾进行了高光谱成像, 在常规的图像信息基础上增加光谱信息, 对分类鉴别提供了更有力的支持。

在此基础上笔者更进一步研发的多模式高光谱海洋原位探测系统, 可以在普通成像、望远成像、显微成像三种模式中任意切换, 通过对莱茵衣藻、集胞藻、角毛藻、小球藻和棕囊藻的高光谱反射谱进行主成分分析, 实现了这几种藻的初步区分。而当结合常规的, 消费级的望远镜进行望远成像时, 可以采取公里级距离的高光谱图谱信息。结合显微物镜则可用于海洋微生物原位监测, 目前已实现了对孢囊(刺激隐核虫, 海洋鱼类传染病载体)的显微高光谱成像, 可用于其体内物质成分分析。

除此之外, 沙姆激光雷达系统在三维形貌重构方面表现优异。笔者团队通过对空气-水界面的折射修正, 使得形貌沙姆激光雷达系统可以应用于水下

环境, 其近距离的恢复精度可达毫米级, 为监测海洋珊瑚礁生态系统、近海岸形貌测绘等提供了新的技术支持。以上提及的系统, 结构紧凑、体积较小, 方便安置, 随着这些技术的进一步发展, 这些系统走向仪器化、工程化, 相信可以在海洋相关应用上发挥好的作用。

参考文献:

- [1] Lu Y, Li X, Tian Q, et al. Progress in marine oil spill optical remote sensing: detected targets, spectral response characteristics, and theories [J]. *Marine Geodesy*, 2013, 36(3): 334-346.
- [2] Fingas M, Brown C E. A Review of oil spill remote sensing [J]. *Sensors*, 2017, 18(1): 91.
- [3] Hu J, Wang D. Monitoring method of ocean oil spilling based on remote sensing [J]. *Environment Protection Science*, 2014, 40(1): 68-73. (in Chinese)
- [4] Hu C, Müller-Karger F E, Taylor C, et al. MODIS detects oil spills in lake maracaibo, venezuela [J]. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 2003, 84(33): 313-319.
- [5] Lu Y, Tian Q, Li X. The remote sensing inversion theory of offshore oil slick thickness based on a two-beam interference model[J]. *Science China Earth Sciences*, 2011, 54(5): 678-685.
- [6] Lu Y, Tian Q, Wang X, et al. Determining oil slick thickness using hyperspectral remote sensing in the Bohai Sea of China [J]. *International Journal of Digital Earth*, 2013, 6(1): 76-93.
- [7] Leifer I, Lehr W J, Simecek-Beatty D, et al. State of the art satellite and airborne marine oil spill remote sensing: application to the BP deepwater horizon oil spill [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2012, 124: 185-209.
- [8] Lu Y, Zhan W, Hu C. Detecting and quantifying oil slick thickness by thermal remote sensing: a ground-based experiment [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2016, 181: 207-217.
- [9] Brekke C, Solberg A H S. Oil spill detection by satellite remote sensing [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2005, 95(1): 1-13.
- [10] Keramitsoglou I, Cartalis C, Kiranoudis C T. Automatic identification of oil spills on satellite images [J]. *Environmental Modelling & Software*, 2006, 21(5): 640-652.
- [11] Brown C E, Fingas M F. Review of the development of laser fluorosensors for oil spill application [J]. *Marine*

- Pollution Bulletin*, 2003, 47(9): 477–484.
- [12] Lennon M, Babichenko S, Thomas N, et al. Detection and mapping of oil slicks in the sea by comined use of hyperspectral imagery and laser induced fluorescence [J]. *EARSel eProceedings*, 2006, 5: 120–128.
- [13] Jiang W T, Li J W, Yao X L, et al. Fluorescence hyperspectral imaging of oil samples and its quantitative applications in component analysis and thickness estimation [J]. *Sensors*, 2018, 18(12): 10.
- [14] Gao F, Li J, Lin H, et al. Oil pollution discrimination by an inelastic hyperspectral Scheimpflug lidar system [J]. *Opt Express*, 2017, 25(21): 25515–25522.
- [15] He L, Song X, Yu F, et al. Potential risk and prevention of phytoplankton outbreak to water-cooling system in nuclear power plant in Fangchenggang, Guangxi [J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2019, 50(3): 700–706. (in Chinese)
- [16] Stumpf R P, Culver M E, Tester P A, et al. Monitoring *Karenia brevis* blooms in the Gulf of Mexico using satellite ocean color imagery and other data [J]. *Harmful Algae*, 2003, 2(2): 147–160.
- [17] Alexander R, Gikuma-Njuru P, Imberger J. Identifying spatial structure in phytoplankton communities using multi-wavelength fluorescence spectral data and principal component analysis [J]. *Limnology and Oceanography: Methods*, 2012, 10(6): 402–415.
- [18] Escoffier N, Bernard C, Hamlaoui S, et al. Quantifying phytoplankton communities using spectral fluorescence: the effects of species composition and physiological state [J]. *Journal of Plankton Research*, 2014, 37(1): 233–247.
- [19] Gao F, Lin H, Chen K, et al. Light-sheet based two-dimensional Scheimpflug lidar system for profile measurements[J]. *Optics Express*, 2018, 26(21): 27179–27188.
- [20] Chen K, Gao F, Chen X, et al. Overwater light-sheet Scheimpflug lidar system for an underwater three-dimensional profile bathymetry [J]. *Applied Optics*, 2019, 58(27): 7643–7648.
- [21] Dirk C W, Delgado M F, Olguin M, et al. A prism-grating-prism spectral imaging approach[J]. *Studies in Conservation*, 2009, 54(2): 77–89.
- [22] Cai F, Wang D, Zhu M, et al. Pencil-like imaging spectrometer for bio-samples sensing [J]. *Biomedical Optics Express*, 2017, 8(12): 5427–5436.
- [23] Chen J, Cai F, He R, et al. Experimental demonstration of remote and compact imaging spectrometer based on mobile devices[J]. *Sensors*, 2018, 18(7): 1989.
- [24] Li J, Jiang W, Yao X, et al. Fast quantitative fluorescence authentication of milk powder and vanillin by a line-scan hyperspectral system [J]. *Applied Optics*, 2018, 57 (22): 6276–6282.
- [25] Huseynova T, Waring G O, Roberts C, et al. Corneal biomechanics as a function of intraocular pressure and pachymetry by dynamic infrared signal and scheimpflug imaging analysis in normal eyes [J]. *American Journal of Ophthalmology*, 2014, 157(4): 885–893.
- [26] Faria-Correia F, Ambrósio Jr R. Clinical applications of the scheimpflug principle in ophthalmology[J]. *Revista Brasileira de Oftalmologia*, 2016, 75: 160–165.
- [27] Miks A, Novak J, Novak P. Analysis of imaging for laser triangulation sensors under Scheimpflug rule [J]. *Optics Express*, 2013, 21(15): 18225–18235.
- [28] Zhao G, Ljungholm M, Malmqvist E, et al. Inelastic hyperspectral lidar for profiling aquatic ecosystems [J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2016, 10(5): 807–813.
- [29] Nakamura S. Background story of the invention of efficient InGaN blue-light-emitting diodes (nobel lecture)[J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2015, 54(27): 7770–7788.
- [30] Pope R M, Fry E S. Absorption spectrum (380–700 nm) of pure water. II. Integrating cavity measurements [J]. *Applied Optics*, 1997, 36(33): 8710–8723.
- [31] Sun L. Research on remote sensing technology of ocean environmental parameters based on laser induced fluorescence [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016. (in Chinese)
- [32] Hakala T, Suomalainen J, Kaasalainen S, et al. Full waveform hyperspectral LiDAR for terrestrial laser scanning [J]. *Optics Express*, 2012, 20(7): 7119–7127.