基于 LCTF 的水下光谱成像系统研制

宋 宏[1],万启新[1],吴超鹏[1],申屠溢醇[1],王文鑫[1],
杨 萍[2],贾文娟[3],李红志[3],黄 慧[1],王杭州[1],詹舒越[1*]

(1. 浙江大学 海洋学院,浙江 舟山 316021; 2. 杭州电子科技大学 数字媒体技术系,浙江 杭州 310018; 3.国家海洋技术中心,天津 300112)

摘 要: 水下光谱成像技术在水下目标物识别、海洋生态监测等领域有着重要作用。基于实际工程使用环境设计了基于液晶可调谐滤光片(LCTF)的水下光谱成像系统。该系统通过采用 LCTF 作为滤光结构以获得水下目标物的光谱信息。水下光谱成像系统在宽光谱 LED 光源的照明下,进行水池实验获得了目标物在波长 400~700 nm 之间的 31 个通道光谱图像。对水下具有相似颜色的不同物体的光谱信息进行了讨论和分析,结果表明:该系统有助于水下目标物识别和分类。在海试中对珊瑚进行了原位观测,成功获取了珊瑚礁的水下光谱图像。该系统有望应用于海洋遥感、海洋生态环境监测等领域。

关键词: 水下光谱成像仪; 光谱图像; LCTF; 颜色识别
中图分类号: P229 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA202049.0203005

Development of an underwater spectral imaging system based on LCTF

Song Hong[1], Wan Qixin[1], Wu Chaopeng[1], Shentu Yichun[1], Wang Wenxin[1], Yang Ping[2], Jia Wenjuan[3], Li Hongzhi[3], Huang Hui[1], Wang Hangzhou[1], Zhan Shuyue[1*]

(1. Ocean College, Zhejiang University, Zhoushan 316021, China; 2. Department of Digital Media, Hangzhou University of Electronic Science and Technology, Hangzhou 310018, China; 3. National Ocean Technology Center, Tianjin 300112, China)

Abstract: Underwater spectral imaging technology plays an important role in underwater object recognition and ocean ecological monitoring. An underwater spectral imaging system using liquid crystal tunable filter (LCTF) was designed based on the actual engineering environment. The system obtained spectral information by using LCTF as a filter structure. Under the illumination of a wide-spectrum LED, a pool experiment was performed to obtain 31 channel spectral images of the target between 400 and 700 nm. The spectral information of objects with similar colors under water was discussed and analyzed. The results show that the system is helpful for underwater target recognition and classification. In-situ observation of corals in the sea trial successfully obtained underwater spectral images of coral reefs. The system is expected to be applied to ocean remote sensing, ocean ecological environment monitoring and other fields.

Key words: underwater spectral imager; spectral image; LCTF; color discrimination

收稿日期: 2019-10-11; **修订日期:** 2019-11-21
基金项目: 国家自然科学基金(61605038、31801619);国家高技术研究发展计划(2014AA093400)
作者简介: 宋宏(1981-),男,副教授,硕士生导师,博士,主要从事水下光学成像方面的研究。Email: hongsong@zju.edu.cn
通讯作者: 詹舒越(1983-),男,讲师,硕士生导师,博士,主要从事计算摄像学方面的研究。Email: shuyue_zhan@zju.edu.cn

0 引 言

光谱成像技术已经在陆地和遥感领域得到了诸多应用,例如地质矿藏勘探、精细农业、军事侦查、海岸带遥感监测等[1-2]。基于光谱成像技术研制的光谱成像仪将图像传感器的空间表示和光谱仪的分析能力相结合,在可见光、近红外、短波红外以及中红外等电磁波谱范围内，为每一个图像像素提供数十乃至数百个窄波段，从而产生一条完整连续的光谱特性曲线。光谱图像立方体数据融合了代表空间几何关系的二维空间信息与代表地物辐射属性的一维光谱信息。因此,光谱成像技术可以获得直观、丰富、准确的地物光谱特征属性，使得地物的精确定量分析和深层次细节提取成为可能。随着光谱成像技术光谱分辨率的不断提高，许多隐藏在狭窄光谱范围内的地物光谱特征属性逐渐被发现[3-5]。

然而光谱成像技术在水下的应用场景仍不是十分明确,且在水下的实际应用存在多方面的困难。其一是水体对光谱辐射能量的选择性衰减作用，包括水体吸收和水体散射，紫外和红外波段的衰减作用尤其严重[6];其二是光谱成像将光谱波段进行了细分,光谱带宽甚至是纳米级别,因此每个波段能量较低,信噪比更差;其三是水下环境复杂多变,存在多重扰动，对系统灵敏度和动态补偿能力的要求大大提高。

目前主要的水下光谱成像系统分为推扫型和凝视型。推扫型水下光谱成像系统利用棱镜分光或者光栅分光的方式使面阵图像传感器获取到一个成像行中的所有光谱维数据，已应用于海洋矿物勘探测绘、海洋生态环境制图与监测等[7],此类系统具有高光谱分辨率等优点，但必须配合额外的姿态传感器或海底轨道以完成图像拼接，这导致了系统的稳定性降低,无法良好地适应海底复杂环境。凝视型水下光谱成像仪则是利用滤光器选择性透射的原理,面阵图像传感器每次只采集一个波段的二维空间图像,无须采用动镜,也无须通过平台轨道运动,通过改变滤光器的透射波段，逐个波段进行成像以得到所有波段的光谱图像,构成光谱图像数据立方体。改变滤光器透射波段的方式可以是电机驱动滤光轮转动以切换不同的滤光片，也可以是通过采用可变滤光器,如圆形可变滤光器、声光可调谐滤光器、液晶可调谐滤光器[8]。利用转轮切换滤光片的方式其通道切换速度和通道数量都受转轮结构所限制，很难在体积与通道数量之间做平衡。

文中针对实际工程问题，设计了一种采用液晶可调滤光片 (Liquid Crystal Tunable Filter, LCTF) 的水下光谱成像系统，包括水下光谱相机和控制软件。该系统可在 400~700 nm 光谱范围内任意波段清晰成像,具有高空间分辨率和高光谱分辨率,同时体积合适,在水中便于运输。

1 系统设计

1.1 系统成像原理

LCTF 是根据液晶电控双折射效应制成的新型分光器件[9],具有光调制、偏转和滤光等功能,由若干 Lyot 波片单元级联构成。在很宽的光谱波段内可电控调谐,通过改变所施加电压的大小,实现对滤光片的动态调制,获得高精度的窄带光谱输出,具有控制简单、调制电压小、快速连续调制等优点。因而可以利用其代替其他光谱分光结构来达到降低系统体积,提高响应速度的目的。

基于 LCTF 的水下高光谱成像系统被设计用于 400~700 nm 的可见光波段内，最大工作水深 100 m。其工作原理如图 1 所示，目标物反射光通过成像物镜后入射 LCTF，而 LCTF 透射峰值波长可随着控制电压的变化而发生改变,响应速度在十毫秒级,特定窄波段的透射光被投射至图像传感器，最终得到单波段光谱图像。依次通过改变 LCTF 控制电压以切换成像波段,CCD 相机依次采集不同波段的光谱图像,获得水下目标物光谱图像立方体数据。

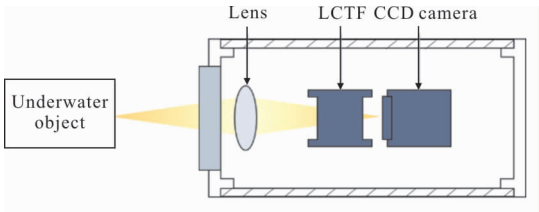

图 1 水下光谱相机原理图

Fig.1 Principle of underwater multispectral imager

1.2 硬件描述

水下光谱成像系统的工作环境为 100 m 以内的浅水区域,因此,可以使用铝制密封舱来保证所有光

学设备以及电子设备正常工作。如图 2 所示，密封舱内的硬件部分包括电动对焦镜头、镜头驱动模块、LCTF、面阵 CCD 相机和内部铝制支架。

水体对光具有很强的吸收以及散射作用，而且 LCTF 透过波段也会对光有削弱作用，这些因素会导致成像质量降低。因此，需要使用具有较高动态范围和较大传感器面积的相机来弥补图像质量。样机中选择了 Lumenera 公司 Lm165m 的单色 CCD 相机，其分辨率为 1 392 pixel×1 040 pixel(2/3″)，动态范围为 65 dB，探测波段为 400~1 000 nm，以在低光照条件下获得更好的图像。

LCTF 选用 CRI 公司 VIS-10 VariSpec Filter 型产品，其光谱分辨率为 10 nm，光谱投射波段范围为 400~720 nm，最大光通量为 500 mW/cm^2，波长调制精度为±0.5 nm，响应时间在 50 ms 以内。该型号产品可以满足水下光谱成像系统工作在 400~700 nm 波段内的要求。但是由于 LCTF 切换透过波段的速度较慢，因此，当需要拍摄目标物多波段光谱信息时，该系统将只适用于水下静目标物。

由于目标物与成像系统距离无法确定，且系统工作在水下，因此，需要系统有自动调整焦距的能力来获得清晰的光谱图像。因此，选用 Canon 公司 EF-S 18~135 mm 镜头，并进行改装，使其可以通过驱动模块进行自动对焦。

由于使用了 LCTF，系统可以装进一个较小的圆柱形密封舱内。圆柱型密封舱的外径和长度分别为 176、580 mm。因为设计的最大工作水深为 100 m，计算得到圆柱体壁厚 9 mm，端盖中心厚度约为 20 mm，其中前端盖装有一块厚度为 20 mm 的光学有机玻璃。

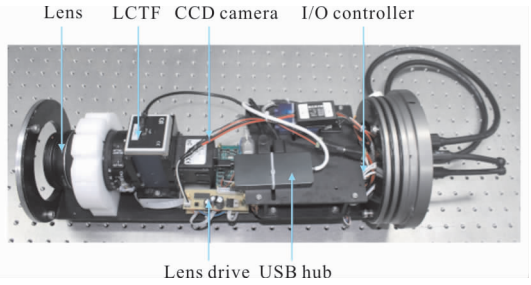

图 2 水下光谱相机样机

Fig.2 Prototype of underwater multispectral imager

1.3 设备控制

系统结构可以被抽象为硬件和上位机软件两个部分。

LCTF 和 CCD 相机均为 USB 接口，利用其配套的软件开发套件(software development kit，SDK)可以轻松地将硬件功能集成到上位机的软件中。镜头驱动模块通过串口接收控制信号，来进一步的驱动电动对焦镜头中的步进电机，以达到自动调焦的目的。由于 USB 通信不支持较长距离的信息传输，因此，上位机在与水下高光谱相机利用网线进行信息传输。上位机通过 IO 控制器向镜头驱动模块、LCTF 和 CCD 相机分发控制命令，同时接收水下光谱相机回传的光谱图像数据与状态信息。

上位机控制软件的主要功能包括 CCD 传感器图像的采集和存储，LCTF 透过波段的控制，电动镜头的自动对焦，以及相机曝光和增益控制。该软件是使用 OpenCV 计算机视觉库、相机和 LCTF 的 SDK 来开发的。

2 测试及实验

2.1 标定测试

为了保证水下光谱成像系统的测量准确性，对该系统的光谱响应特性、光谱分辨率特性进行定标工作，如图 3 所示。

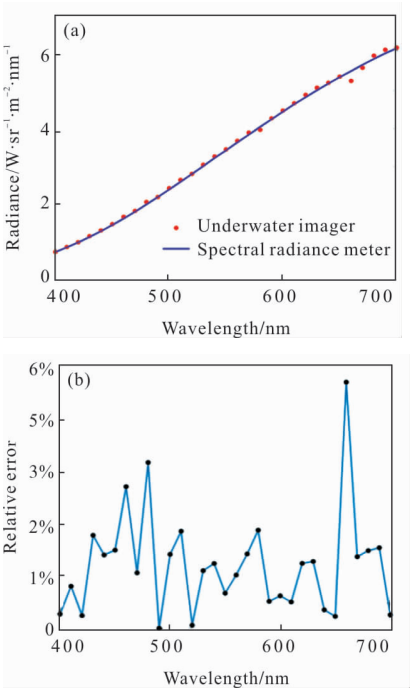

图 3 光谱响应特性

Fig.3 Spectral response characteristics

光谱响应特性定标为:标准光谱辐亮度计与水下光谱相机在同样的距离拍摄同一个带有稳压电源的积分球,通过比较标准辐亮度计和水下光谱相机的数据来确定相机误差。图 3 中最大相对误差不超过 5.71%,即相机能够准确获取目标物辐亮度信息。

光谱分辨率标定过程为:设置水下光谱成像系统的透过波长为 λ,设置单色仪的波长以 2 nm 步长从 λ-20 nm 增加到 λ+20 nm,拍摄得到光谱成像仪在波长 λ 情况下的光谱响应。λ 从 400 nm 以 10 nm 为步长增加到 700 nm,重复上述过程。将得到的 31组数据对组内最大值进行归一化,结果如图 4 所示,相邻波段的鞍峰比均小于 0.8,说明该系统的光谱分辨率优于 10 nm。

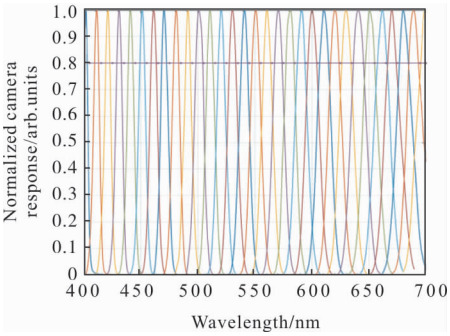

图 4 光谱分辨率标定结果

Fig.4 Spectral resolution calibration result

标定测试结果表明:该水下光谱成像系统能够准确拍摄到目标物的光谱信息。

2.2 水池实验

为了进一步评估水下光谱成像系统的性能,进行了水池实验。如图 5 所示,水池实验所用到的实验装置包括 LED 光源、水下光谱成像系统,水池实验观测的目标物为塑料色板。

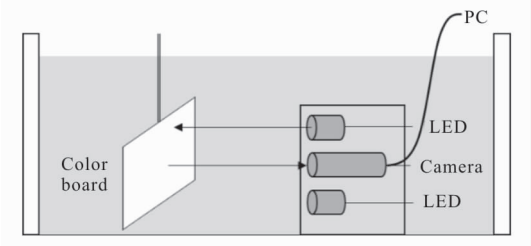

图 5 水池实验原理图

Fig.5 Principle of pool experiment

水下光谱相机与 LED 照明光源一起安装在铝制支架上。因为水体对不同波段的光具有不同的吸收率且水中光强随传播距离呈指数衰减,因此,使用了 6 个 LED 光源来提供充足的照明。每个 LED 光源有 4 个发光芯片,由于水对红、紫光具有强烈的吸收作用,而对蓝绿光有较好的投射作用,因此,笔者选择了红、白、紫 3 种发光芯片,其光谱曲线如图 6 所示。作为目标物的塑料色板由 60 个不同颜色的色块组成。60 个色块按照色相和色度的变化在色板上排列成 6 行 10 列的矩形。

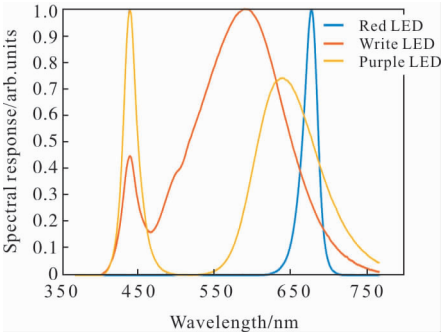

图 6 LED光源光谱曲线

Fig.6 LED spectral curve

宽光谱光从 LED 光源发出,照射到塑料色板后反射,最后由水下光谱成像系统接收。塑料色板通过行车悬挂在水中,可以移动行车来改变成像距离。水下光谱成像系统通过调整 LCTF 的透过波段,依次拍摄 400、410、…、700 nm 波长的单光谱图像,从而获得目标物的光谱信息。每一组光谱信息由 31 张单光谱图像组成。此外为了排除环境光和传感器暗电流噪声带来的影响,还需要获取一组 LED 光源关闭情况下的目标物光谱信息,即背景信息。

获得目标物光谱信息和背景信息后,使用图像处理技术通过以下步骤可以评估系统的对不同色块的区分效果:

(1) 每张单光谱图像减去相应的背景光光谱图像以获得目标物的光谱图像。

(2) 由于不同成像波长的曝光时间不一致,应对其进行标准化。由于相机响应和曝光时间呈线性关系,则可以根据公式(1)进行修正:

$$S_n=\frac{t_{\min}}{t_n}*I_n \quad S_n=1,\ 2,\ \cdots,\ 31 \tag{1}$$

式中:S_n 为第 n 个通道修正后的光谱图像;$t_{\min}$ 为 31个通道中最小曝光时间;I_n 为第 n 个通道的目标物光

谱图像；t_n 为第 n 个通道的曝光时间。

(3) 比较标准化曝光时间后的光谱响应曲线，其可以体现不同色块之间的光谱成像差异。

水池测试的部分数据结果展示在图 7 中，色板与水下光谱相机水平距离为 3.5 m。图 7 左上角为塑料色板的彩色图像，其余为水下光谱成像系统拍摄得到的单光谱图像。随着波段的改变，单光谱图像中不同色块会发生明暗变化。

图 8 展示了对同一张光谱图像的分析结果，图 8(a)在同一个青色色块中选取 3 个点，其光谱曲线展示在图 8(b)中，所选的 3 个点的光谱曲线差异不明显；图 8(c)在相近的 3 个色块中各选取一个点，其光谱曲线展示在图 8(d)中，所选的 3 个点的光谱曲线差异明显。

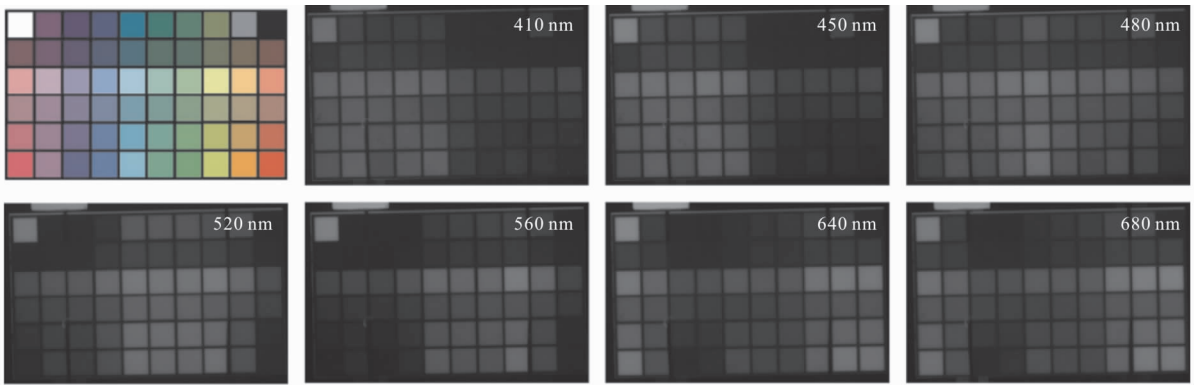

图 7 色板以及部分水池实验数据

Fig.7 Color board and a part of pool experiment data

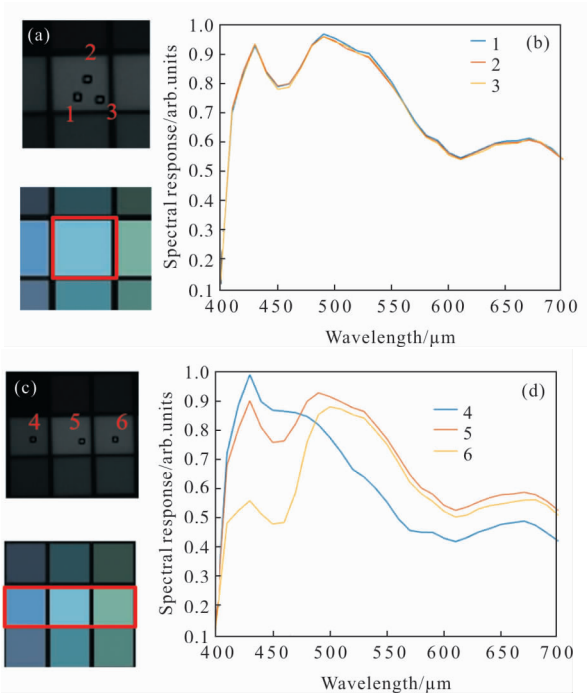

图 8 (a) 3 个点在同一色块的光谱图像以及对应的彩色图像；(c) 3 个点在不同色块的光谱图像以及对应的彩色图像；(b)、(d)归一化后的采样点光谱曲线

Fig.8 (a) Spectral and color photos, points on the same color piece; (c) Spectral and color photos, points on the different color pieces; (b), (d) normalized spectral response curves of points

图 9 展示了不同距离下对同一色块的光谱图像分析结果。从图中可以看出：在不同距离下，同一色块的光谱曲线趋势类似，但幅度不同，两两之间的光谱角小于 0.1。

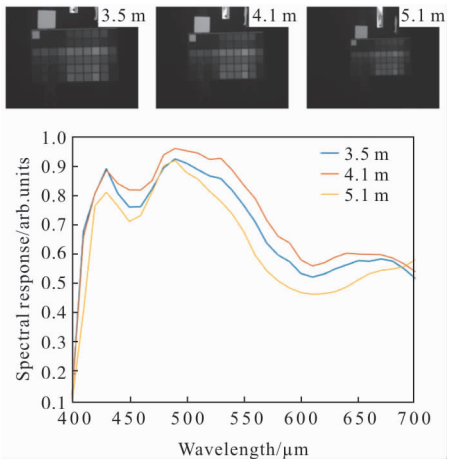

图 9 不同距离的光谱图像

Fig.9 Spectral images in different distances

表 1 为图 8 中 6 个数据点之间的光谱角信息。表中的数据表明，对于不同的颜色，水下光谱成像系

统具有较强的区分能力。此外相对于普通的彩色相机,即图像只有 RBG3 通道而言,水下光谱成像具有更强的区分能力。

表 1 不同数据点之间的光谱角

Tab.1 Spectral angle between different data points

	RGB	Underwater imager
θ_{12}	0	0.008 5
θ_{13}	0	0.006 2
θ_{23}	0	0.007 2
θ_{5}	0.100 1	0.162 7
θ_{46}	0.212 6	0.317 2
θ_{56}	0.113 5	0.157 2

2.3 海 试

海试在深圳市大澳湾海域进行。实验装置采用水池实验时相同的装置，对近海海底珊瑚进行原位观测。

图 10 所示为海试中水下光谱成像系统采集到的部分波段的珊瑚光谱图像，珊瑚由于被短波长蓝色 LED 照射,受到激发发出荧光,珊瑚旁边人工放置的标定板无荧光效应。因此,珊瑚和标定板在不同波段下的光谱图像差异明显,在蓝色激发光波段,标定板由于反射率较高而表现出较高的光谱响应;在蓝色 LED 出射光谱范围外，即 490~700 nm 波段，标定板部分光谱图像响应十分微弱，珊瑚部分光谱图像表现出明显的荧光光谱响应，从而反映了珊瑚发出的荧光在不同波段的分布。此外,珊瑚的不同部分发出的荧光强度不同，荧光强度可以表示珊瑚的健康状态[10]。这表明水下光谱成像系统能够在真实的海洋环境中获得目标物的光谱信息且在水下物体分类和海洋生态监测方面有着应用潜力。

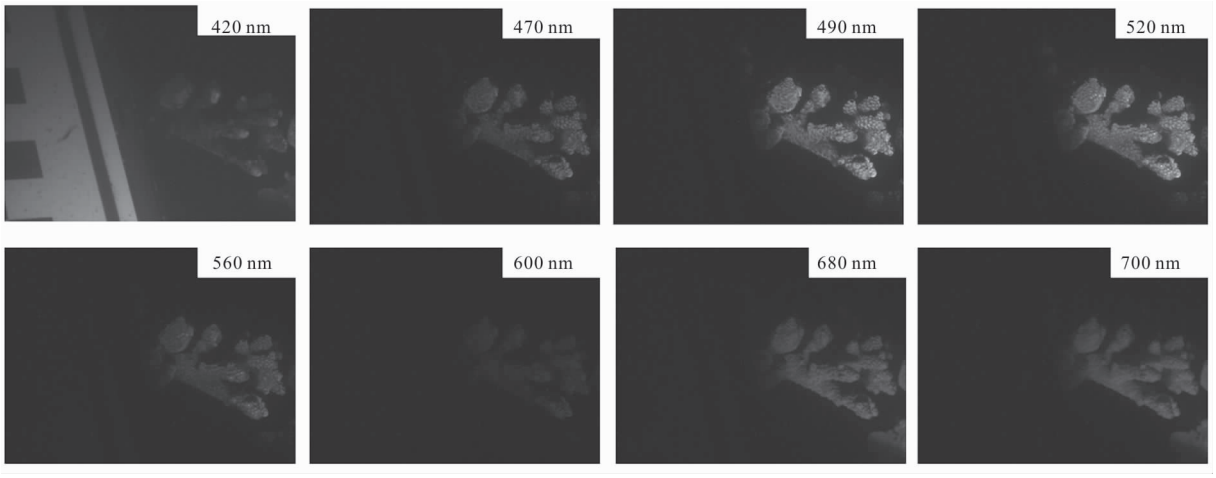

图 10 珊瑚光谱图像

Fig.10 Spectral images of coral

3 结论与展望

文中提出了一种基于 LCTF 的水下光谱成像系统,该系统使用 LCTF 作为分光结构,使系统体积保持在一个较小的水平且具有较快的切换速度和较高的光谱分辨率。水池实验和海试结果表明:该系统能够在水下正常工作且可以获得水下静目标物 400~700 nm 波段内的光谱信息。此外水下光谱成像系统可以突出颜色相近的不同物体之间的区别，这对水下目标物识别与分类和海洋生态环境监测有着重要意义。

参考文献:

[1] Xu Hong, Wang Xiangjun. Applications of multispectral/hyperspectral imaging technologies in military [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2007, 36 (1): 13-17. (in Chinese)
许洪, 王向军. 多光谱、超光谱成像技术在军事上的应用 [J]. 红外与激光工程, 2007, 36(1): 13-17.

[2] Pei Xinbiao, Wu Helong, Ma Ping, et al. Design and experiment of multi rotor UAV control system with spectral remote sensing load [J]. ***Infrared and Laser***

Engineering, 2019, 48(1): 0118003. (in Chinese)
裴信彪, 吴和龙, 马萍, 等. 搭载光谱遥感载荷的多旋翼无人机控制系统设计与试验 [J]. 红外与激光工程, 2019, 48 (1): 0118003.

[3] Geir Johnsen, Martin Ludvigsen, Asgeir Sorensen, et al. The use of underwater hyperspectral imaging deployed on remotely operated vehicles-methods and applications [J]. ***IFAC Papers on Line***, 2016, 9(23): 476-481.

[4] Mehrube Mehrubeoglu, Dustin K Smith, Shane W Smith, et al. Investigating coral hyperspectral properties across coral species and coral state using hyperspectral imaging [C]//Optics & Photonics-Optical Engineering+ Applications, 2013: 21.

[5] Yu Lei. Upgrade of a UV -VIS -NIR imaging spectrometer for the coastal ocean observation: concept, design, fabrication, and test of prototype [J]. ***Optics Express***, 2017, 25(13): 11526.

[6] Chen Ying, Qu Fengzhong, Song Hong, et al. Marine Technology Course [M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2012: 74-75. (in Chinese)
陈鹰, 瞿逢重, 宋宏, 等. 海洋技术教程[M]. 杭州. 浙江大学出版社, 2012: 74-75.

[7] Dumke I, Nornes S M, Purser A. First hyperspectral imaging survey of the deep seafloor: High-resolution mapping of manganese nodules [J]. ***Remote Sensing of Environment***, 2018, 209: 19-30.

[8] He Wei. Underwater spectral imaging with filter wheel [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2018. (in Chinese)
魏贺. 基于轮转滤光片的水下光谱成像技术研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2018.

[9] Yang Weifeng, Hong Jin, Qiao Yanli. Optical system design of airship multispectral camera based on LCTF [J]. ***Journal of Atmospheric and Environmental Optics***, 2012, 7(3): 235-240. (in Chinese)
杨伟锋, 洪津, 乔延利. 基于 LCTF 的艇载多光谱 CCD 相机的光学系统设计[J].大气与环境光学学报, 2012, 7(3): 235-240.

[10] Chen Qidong. Analysis of spectral characteristics of coral under different growth patterns[J]. ***Acta Ecologica Sinica***, 2015, 35(10): 3394-3402. (in Chinese)
陈启东. 不同生长状态珊瑚光谱特征[J]. 生态学报, 2015, 35(10): 3394-3402.