DOI:10.16136/j.joel.2021.06.0422

基于激光偏振技术的海洋牧场水下成像技术研究

王伟亭^{1,2},冯巍巍^{2,3,4*1},朱智林¹,金维维^{1,2}

(1.山东工商学院,山东烟台 264003; 2.中国科学院烟台海岸带研究所海岸带环境过程与生态修复重点实验 室,山东烟台 264003; 3.中国科学院海洋大科学研究中心,山东青岛 266071; 4.中国科学院大学,北京 100049)

摘要:良好的水下视觉环境是推动海洋经济发展的前提,海洋牧场的建设对水下成像技术提出新 的要求,但是受水体环境吸收及散射影响,光信息丢失严重,用常规光学成像方式进行水下图像 获取会有可视距离短,图像模糊不清,对比度低等缺点。为解决海洋牧场水下成像清晰度低的问 题,提出一种通过 532 nm 激光光源与偏振技术相结合的方法并集成了一款水下相机。532 nm 波段 的绿色激光光源在水体环境中受到水体影响较小,传播效果更佳,偏振成像技术在去背景光散射中 应用广泛,采用 532 nm 激光光源与偏振成像技术相结合的方法进行水下图像的获取,并在模拟海 水环境的水池中进行了海参图像获取的实验,实验结果证明在某一偏振角度下,532 nm 激光光源 与偏振成像技术相结合的方式获取的海参图像相比于自然光下获取的原图像对比度、清晰度更高, 含有的图像信息更加丰富,验证了此方法在水下成像的可行性。 关键词:偏振技术;激光光源;图像获取;海洋牧场

中图分类号:O436;O439 文献标识码:A 文章编号:1005-0086(2021)06-0581-06

Research on underwater imaging technology of ocean Ranch based on laser polarization technology

WANG Weiting^{1,2}, FENG Weiwei^{2,3,4*}, ZHU Zhilin¹, JIN Weiwei^{1,2}

(1. Shandong Technology and Business University, Yantai, Shandong 264003, China; 2. Key Laboratory of Coastal Environmental Processes and Ecological Remediation, Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences, Yantai, Shandong 264003, China; 3. Center for Ocean Mega-Science, Chinese Academy of Sciences, Qingdao, Shandong 266071, China; 4. University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: A good underwater visual environment is a prerequisite for promoting the development of marine economy. The construction of marine pastures puts forward new requirements for underwater imaging technology. However, due to the absorption and scattering of the water environment, the loss of light information is serious. Conventional optical imaging methods are used for underwater imaging. Image acquisition has shortcomings such as short visible distance, blurred images, and low contrast. In order to solve the problem of low definition of underwater imaging of ocean pastures, a method combining 532 nm laser light source and polarization technology is proposed and an underwater camera is integrated. The 532 nm band green laser light source is less affected by the water body in the water environment, and the propagation effect is better. Polarization imaging technology is widely used in removing background light scattering. The combination of 532nm laser light source and polarization imaging technology is used for underwater image acquisition. The sea cucumber image acquisition experiment was carried out in a pool that simulates seawater environment. The experimental results prove that the sea cucumber image acquired by the combination of 532 nm laser light source and polarization imaging technology at a certain polarization angle is compared with the sea cucumber image acquired under natural light. The o-

* E-mail:wwfeng@yic.ac.cn

收稿日期:2020-12-13 修订日期:2021-04-18

基金项目:国家重点研发计划项目(2019YFD0900802)、中国科学院 STS 项目(KFJ-STS-ZDTP-077)和山东省重点研发计划 (2019JZZY010810)资助项目 riginal image has higher contrast and sharpness, and contains richer image information, which verifies the feasibility of this method in underwater imaging.

Key words: polarization technology; laser; image acquisition; ocean ranch

1 引 言

我国拥有近 3×10⁶ 平方公里的广阔海域面 积,海洋资源的开发利用对我国的国产经济、科技 进步都有深远意义。海洋资源的开发对水下成像 技术提出更高的要求,水下成像目前市场上有两 种方式:光学成像以及声学成像,声学成像传输距 离较远但是分辨率较低,多用于海底地形勘测,高 分辨率的声呐设备造价昂贵,一般用于科研或是 军事。光学成像以图像形式直观的传输水下环 境,更便于人眼观测,具有传输速度快,分辨率高, 实时性强等优点^[1,2],也是目前海洋牧场以及水产 养殖企业进行水下环境监测最常用的成像方法。

我国科学家为实现水产资源增殖,于20世纪 中叶提出了"海洋农牧化"理念,包括"水即是鱼类 的牧场"、"使海洋成为种植藻类和贝类的农场,养 鱼、虾的牧场"等。截至2016年,全国已投入约 $5.58 \times 10^{\circ}$ 元的海洋牧场建设资金,共建立 200 多 个海洋牧场,投放鱼礁超过 3×10^7 空立方米,总 涉及海域面积 2 300 平方千米。海洋牧场已成为 海洋经济新的增长点[3,4],成为沿海地区增殖、养 护海洋生物资源、修复海域生态环境、实现渔业 转型升级的重要手段[5,6]。在水体环境中,光会受 到水体的吸收以及水中颗粒物散射影响[7,8],光信 息衰减较大,水体介质对目标光的吸收、散射和颜 色失真是水下光学成像的三大主要问题[9],用传 统成像方式进行水下图像获取最终呈现的图像效 果整体模糊,分辨率低,偏振技术在雾霾等介质中 可以提高目标物与背景的对比度,从而提高图像 的成像质量[10],利用光波的偏振特性实现水下成 像属于散射成像的范畴,将水体视为具有特定性 质的散射介质。偏振信息最早用于生物组织诊 断,通过偏振光在生物组织传输过程中产生的偏 振态变化来表征样本的状态和特性[11,12]。受此启 发,结合水体光学特性可以通过散射、吸收等过 程表征的事实,研究者们将偏振成像技术应用于 水下目标探测,并进行了深入的理论分析和有力 的实验验证[13,14]。同时,利用主动激光照明与偏 振技术相结合的系统,涉及多学科、多技术的交叉 与融合[15,16],弥补了传统成像方法的劣势和不足。 可在低照度条件下实现目标探测和识别,且具有 成像效果好、对比度高以及适应性强等优点[17]。 本文以典型的海珍品(海参)为例,将偏振技术与

激光照明技术结合,实验结果显示,在某一偏振 角度下,相比于常规成像,采用激光光源与偏振技 术相结合的成像所收集的海参图像对比度更高, 图像信息更加丰富,更易于识别。

2 实验原理

2.1 偏振成像原理

目前用于描述偏振信息的方法主要有琼斯矢量 法和斯托克斯表示法。由于琼斯矢量法仅能够用来 表示完全偏振光,实际应用功能有限,因此常用斯托 克斯表示法来计算偏振信息,斯托克斯矢量法由 Stokes于1852年提出,该矢量由4个参量组成^[18], 如公式(1)所示:

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} I \\ Q \\ U \\ V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{0^{\circ}} + I_{90^{\circ}} \\ I_{0^{\circ}} - I_{90^{\circ}} \\ I_{45^{\circ}} - I_{135^{\circ}} \\ I_{r} - I_{l} \end{bmatrix}$$
(1)

公式(1)中,*S* 代表斯托克斯矢量,由 I、Q、U 和 V 4 个参量组成,其中 I 代表探测总光强,Q 代表 0° 和 90°偏振方向上光强度的差值,U 代表 45°和 135° 两偏振方向上光强度的差值,V 代表光波中的圆偏振 成分; $I_{0^{\circ}}$, $I_{45^{\circ}}$, $I_{90^{\circ}}$ 和 $I_{135^{\circ}}$ 分别代表总光强在 4 个不同 方向上的分量; I_r 和 I_i 分别代表光波中的右旋和左 旋圆偏振光分量。

利用斯托克斯参数也可以推出其他相关偏振信息,例如偏振度、线偏振度、圆偏振度、偏振角,由于 本文实验所用的传感器为 Sony IMX250MZR,并没 有计算圆偏振这一参量,因此参量 V 为 0,只计算线 偏振度与偏振角,公式(2)为线偏振度,公式(3)为偏 振角:

$$DOLP = \frac{\sqrt{Q^2 + U^2}}{I} \tag{2}$$

$$\varphi = \frac{1}{2} \arctan^{f(\varphi)} \left(\frac{U}{Q} \right) \tag{3}$$

线偏振度(DOLP)是指线偏振分量在总光强中 所占的比例,偏振角(*φ*)指示光波的优势偏振 方向^[19]。

2.2 水体对光波的吸收以及散射影响

光在水中传播过程中会受到水体吸收以及水中 颗粒物、微生物的散射影响,不同波长的光线所受影 响也会有所不同。1981年,Smith和 Baker^[20]测量 了纯海水在 200 nm-800 nm 波长范围内吸收系数 和散射系数随波长的变化关系,实验结果显示 400-500 nm 波段的光受到的水体吸收影响是最小的,同 时,随着波长增大,光受水体散射影响逐渐减小,在 500 nm 之后波段的光受到的散射影响逐步趋于平 缓,说明光在水下传输的过程中,相比于其他波段的 光而言,蓝绿波段的光能够更好地克服水体吸收以 及散射影响,从而在水下传输更远的距离。根据光 波水体吸收散射这一关系,本文在实验中选用常见 的 532 nm 的绿色激光作为主动光源。

3 实验部分

3.1 系统组成

论 文 研 制 的 水 下 偏 振 成 像 设 备 由 Sony IMX250MZR 传感器、532 nm 绿色激光光源、变焦镜 头,控制单元四部分构成,Sony IMX250MZR 传感 器由+12 V 电源供电,超六类网线进行数据传输,变 焦镜头由+12 V 电源供电,RS-485 进行通讯, 532 nm激光光源由+5 V 电源供电,控制单元负责 镜头、532 nm 激光光源参数设置以及电压转换供电。 设备构成原理图如图 1 所示。



图1 设备构成原理图

Fig. 1 Schematic diagram of equipment composition

如上图 1 所示,传感器经由数据传输线缆连接 到 PC 端,将水下图像数据传输到上位机,同时,PC 端配有相应软件实现对传感器的参数设置以及水下 图像的保存等功能。控制单元负责对传感器,变焦 镜头,激光光源进行供电以及对变焦镜头的控制,设 备进行水下工作时,将设备搭载至水下机器人,通过 上位机软件开启传感器进行水下图像的获取,开启 激光光源进行主动照明,当观测到海参,通过上位机 软件控制变焦镜头进行聚焦变倍调整,达到最佳视 觉效果保存图像。

样机内部结构如图 2 所示,结构前端用于支撑 Sony IMX250MZR 传感器、变焦镜头以及 532 nm 绿 色激光光源,后端放置控制板,图 3 为样机外观设 计,样机设计为圆柱状结构,可尽量减少机器体积, 同时在海洋牧场进行外场试验时可减少部分水流阻 力影响,系统两根线缆分别用于供电以及数据传输。 样机完成后经过了压力测试,确保机器的防水性能, 防止机器在外场试验因为漏水而影响正常工作。



图 2 样机内部结构 Fig. 2 Prototype internal structure



图 3 样机外观 Fig. 3 Prototype appearance

4 实验结果及分析

样机完成后在实验室水池中模拟浑浊水体环境 进行实验,实验现场如图 4 所示,以海参作为研究对 象,研究了同一探测角度下分别在自然光以及 532 nm 光源下的成像效果。



图 4 实验过程 Fig. 4 Experimental process

实验采集了自然光环境以及 532 nm 激光光源 环境下的原图像、偏振方向为 0°、45°、90°、135°图像、 线偏振度图像以及根据偏振角所构建的伪彩色图像 共 7 幅图像。在自然光和 532 nm 激光光源照明下, 实验结果分别如图 5、图 6 所示。

从视觉效果看,在自然光环境下,45°偏振图像相 比于原图以及其他偏振方向的图像,海参对比度效 果更好,在 532 nm 光源环境下,90°偏振图像相比于 原图以及其他偏振方向的图像,海参对比度效果更 好,综合两次实验,视觉效果最佳图像为 532 nm 激 光光源下 90°偏振图像。图 7 是原图像以及 532 nm 激光光源下 90°偏振图像的对比效果图。



图 5 自然光下采集图像:(a) 原图像;(b) 0°偏振图像;(c) 45°偏振图像;(d) 90°偏振图像; (e) 135°偏振图像;(f) 线偏振度图像;(g)伪彩色图像

Fig. 5 Image acquisition under natural light: (a) Original image; (b) 0° polarization image; (c) 45° polarization image; (d) 90° polarization image; (e) 135° polarization image;

(f) Linear polarization image and formed according to the polarization angle; (g) Pseudo-color image



(a) (b) (c) (d)

图 6 532 nm 激光光源下采集图像:(a) 原图像;(b) 0°偏振图像;(c) 45°偏振图像;(d) 90°偏振图像; (e) 135°偏振图像;(f) 线偏振度图像;(g)伪彩色图像

Fig. 6 Images collected under 532 nm laser light source: (a) Original image; (b) 0° polarization image;
(c) 45° polarization image; (d) 90° polarization image; (e) 135° polarization image;

(f) Linear polarization image and formed according to the polarization angle; (g) Pseudo-color image





图 7 原图像及 532 nm 激光光源 90°偏振图像:(a) 原图像;(b) 532 nm 激光光源下 90°偏振图像的对比效果图 Fig. 7 Original image and 90° polarization image of 532 nm laser light source:(a) The original image; (b) The contrast effect diagram of the 90° polarization image under the 532 nm laser light source

为验证实验结果准确性,在数值上对图像一些 信息进行计算,首先计算了原图像和 532 nm 激光光 源 90°偏振图像的直方图分布,计算结果如图 8 所 示。图 8 中图 8(a)为原图像灰度直方图,图 8(b)为 532 nm 激光光源 90°偏振图像的灰度直方图,图中横



坐标为灰度值,范围 0-250,纵坐标为像素数。在原 图像中,灰度分布大约在 100 至 200 之间,532 nm 激 光光源 90°偏振图像分布在 0 至 250 均有分布,从直 方图效果看,532 nm 激光光源 90°偏振图像灰度分布 信息更加丰富。



图 8 原图像及其灰度直方图:(a)原图像; (b)532 nm 激光光源下 90°偏振图像的灰度直方图 Fig. 8 Original image and grayscale histogram:(a) Original image;

(b) Grayscale histogram of 90° polarization image under 532 nm laser light source

最后,对原图像及 532 nm 激光光源 90°偏振图 像的信息熵、方差、标准差做了相关计算,计算结果 如表 1 所示:其中信息熵作为评价图像的一个量化 标准,信息熵越大所包含的信息量越大,其中 532 nm 激光光源下 90°偏振图像的信息熵值是高于原图像, 说明经过处理后的图像所包含信息更加丰富。同 时,532 nm 激光光源下 90°偏振图像的方差以及标准 差也远远大于原图像,说明离散程度更高,图片的对 比度也更高,从另一个角度提升了目标物与环境的 对比度。

表 1 原图像及 532 nm 激光光源下 90°偏振图像信息对比

Tab. 1 Comparison of original image and 90° polarization

image information under 532 nm laser light source

	The information entropy	The variance	The standard deviation
The original image Polarization 90	5.4076	171.1224	13.0815
Degree image under 532 nm laser light source	6.7879	1810.9827	42.5561

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

5 结 论

本文设计一款 532 nm 绿色激光光源与偏振技 术相结合的水下成像系统,并在模拟海洋牧场水体 浑浊环境进行了成像实验。通过实验结果可以看 出,在浑浊水体环境中,相比于常规成像方式,通过 532 nm 激光主动照明与偏振技术相结合的方式,在 某一偏振角度下,所获取的偏振图像相比于原始图 像而言图像信息更加丰富,成像效果更加清晰,证明 532 nm 了绿色激光光源与偏振技术相结合的水下成 像方式可以通过高对比度的图像信息从而能够使目 标物有更好的分辨度,能够为海洋牧场水下观测提 供新的思路。

参考文献:

[1] HAN P L. Research on polarization imaging detection technology of underwater targets[D]. Xi' an: Xidian University, 2018.

韩平丽.水下目标偏振成像探测技术研究[D].西安:西 安电子科技大学,2018.

- [2] PANETTA K, GAO C, AGAIAN S. Human-visual-systemin-spired underwater image quality Measures [J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2016, 41(3):541-551.
- [3] YANG H S. Reflections on the silicon valley construction of modern aquatic seed industry [J]. Marine Science, 2018,42(10):1-7.
 杨红生.现代水产种业硅谷建设的几点思考[J].海洋科 学,2018,42(10):1-7.
- [4] YANG H S. Research trends on the construction of " aquatic ecological pasture" of Chinese Academy of Sciences[J]. Science and Technology for Development, 2020,16(2):130-131.
 杨红生.中国科学院"水域生态牧场"构建研究动态[J].

科技促进发展,2020,16(2):130-131.

LIN C G, YANG H S, CHEN Y, et al. Construction and development of modern ocean pastures——a summary of the 230th shuangqing forum[J]. National Science Foundation of China. 2014, 28(2):203-211.
 林承刚,杨红生,陈鹰.等.现代化海洋牧场建设与发展。

展——第 230 期双清论坛学术综述[J].中国科学基金. 2014,28(2):203-211.

[6] YANG H S, ZHANG S Y, ZHANG X M, et al. Strategic thinking on the construction of China's modern ocean pasture[J]. Journal of Fishery Sciences, 2019, 27 (4): 142-148.

杨红生,章守宇,张秀梅,等.中国现代化海洋牧场建设 的战略思考[J].水产学报,2019,27(4):142-148.

- [7] LEE Z, CARDER K L, ARNONE R A. Deriving inherent optical properties from water color: a multiband quasi-analytical algorithm for optically deep waters [J]. Applied Optics, 2002, 41(27): 5755-5772.
- [8] GORDON H R, BROWN O B, JACOBS M M. Computed relationships between the inherent and apparent optical properties of a flat homogeneous ocean[J]. Applied Optics, 1975, 14(2): 417-427.
- [9] TIAN H,ZHU J P,TAN S W, et al. Rapid underwater target enhancement method based on polarimetric imaging [J]. Optics and Laser Technology, 2018, 108 (1): 515-520.
- [10] LIU F,SHAO X,XU J,et al. Design of a circular polarization imager for contrast enhancement in rainy conditions [J]. Applied Optics,2016,55(32):9242-9249.
- [11] PU Y, WANG W, TANG G, et al. Spectral polarization imaging of human prostate cancer tissue using a near-infrared receptor-targeted contrast agent [J]. Technology in Cancer Research and Treatment, 2005, 4(4): 429-436.
- [12] KOROTKOVA O, WOLF E. Changes in the state of polarization of a random electromagnetic beam on propagation [J]. Optics Communications, 2005, 246(3): 35-43.
- [13] XU M, ALFANO R. Circular polarization memory of light [J]. Physical Review E,2005,72(6):065601.
- [14] BOFFETY M, GALLAND F, ALLAIS A G. Influence of polarization filtering on image registration precision in underwater conditions [J]. Optics Letters, 2012, 37 (15): 3273-3275.
- [15] XIE M L,MA C W,LIU K, et al. The application of active polarization imaging technology of the vehicle theodolite [J]. Optics Communications, 2019, 433(5):74-80.
- [16] XIE M L,LIU P,MA C W, et al. Application research of high-precision laser beam pointing technology in airborne aiming pod[J]. Optik, 2019, 183(2):775-782.
- [17] GOLDSTEIN D H. Polarized Light[M]. Boca Raton; CRC Press, 2010.
- [18] ONES R C. A new calculus for the treatment of optical systemsi. description and discussion of the calculus [J]. JOSA, 1941, 31(7): 488-493.
- [19] LIU F. Polarization imaging technology through chaotic media[D]. Xi'an: Xidian University, 2016.
 刘飞.透混沌介质偏振成像技术[D]. 西安:西安电子科技大学, 2016.
- [20] SMITH R C, BAKER K S. Optical properties of the clearest natural waters (200 800 nm)[J]. Applied Optics, 1981,20(2):177-184.

作者简介:

冯巍巍 (1980-),男,研究员,研究方向为海洋环境光学.