

# 水下材质识别技术的研究

李代林,于洋,李贵雷,杨丹,张传法,王宁,朱化凤

中国石油大学(华东)理学院,山东 青岛 266580

**摘要** 水下成像技术是水下探测的一个研究热点。针对目前水下成像装置存在的不足,设计了新的水下目标成像及处理系统,对该系统所采用的成像方案、成像原理、成像分析及处理算法进行了研究。基于菲涅耳定律进行理论分析和数值模拟,使用 MATLAB 软件对常见材质进行反射偏振特性模拟,获取反射光中两垂直分量振幅比和相位差;采用改进的成像系统获得物体的斯托克斯参量;对所得参量进行处理,计算得出偏振度和偏振角图像,将之转换至 HSV 及 Lab 空间,并对图像特点进行分析。结果表明,引入偏振度和偏振角图像能突出图像材质信息,增强实验中材质对比度,更利于人眼识别。

**关键词** 图像处理; 偏振光; 斯托克斯矢量; 水下成像

中图分类号 O436.3 文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.071010

## Study of Underwater Material Recognition Technology

Li Dailin, Yu Yang, Li Guilei, Yang Dan, Zhang Chuanfa, Wang Ning, Zhu Huafeng

College of Science, China University of Petroleum, Qingdao, Shandong 266580, China

**Abstract** Underwater imaging technology is one of the research hotspots in underwater exploration. According to the current problems of underwater imaging devices, a new target imaging and processing system is proposed. The imaging scheme, imaging principle, imaging analysis and processing algorithm are studied. Firstly, theoretical analysis and numerical simulation are carried out based on the Fresnel's law. Specifically, the MATLAB software is used to simulate the reflection polarization characteristics, and the amplitude ratio and phase difference of two vertical components in reflected light are obtained. Secondly, in the case of liner polarized laser illumination, based on the Stokes imaging theory, the polarization information of the object is detected, and the Stokes parameters of the object are obtained. Finally, the polarization degree and polarization angle images are obtained and analyzed after being converted into HSV space and Lab space. The results show that the polarization degree and polarization angle images can highlight the material information, improve the contrast of different materials and make it more easier to be recognized by human eyes.

**Key words** image processing; polarized light; Stokes vector; underwater imaging

**OCIS codes** 100.2000; 240.5445; 300.6230

## 1 引言

水下光学成像在海洋资源勘探、海洋军事侦查以及水下救生等领域的应用非常重要<sup>[1]</sup>。现有成像系统存在较多的局限性:1) 水体对光有较强的折射、吸收和卷积效应,从而导致水下成像质量较差<sup>[2-3]</sup>;2) 成像距离极近,且一般没有色彩信息,再加上受水下气泡和浮游颗粒物体的影响(尤其是混

浊水域的水下成像),真实环境下的水下图像难以辨识。

为解决水下成像距离近且质量差等问题,引入了偏振成像探测技术<sup>[4-6]</sup>。偏振成像探测技术在传统强度成像基础上增加了偏振信息维度,是一种获取目标二维空间光强分布以及偏振特性分布的新型光电成像技术,近年来偏振成像探测技术在油田测井<sup>[7]</sup>、海洋探测开发<sup>[8-9]</sup>、生物医学<sup>[10-11]</sup>及空间探

收稿日期: 2017-12-20; 收到修改稿日期: 2018-01-09

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC1404000)、国家自然科学基金(11504432)、中石油创新基金(2015D-5006-0604)、中央高校基本科研业务费专项资金资助(15CX05026A, 15CX05055A, 15CX02061A)、青岛青年科技计划(16-5-1-6-jch)

作者简介: 李代林(1973—),男,博士,副教授,主要从事偏振光相关方面的研究。E-mail: qd\_ldl@upc.edu.cn

测<sup>[12-14]</sup>等领域崭露头角。不同物体或同一物体在不同状态下反射光的偏振态有所不同。偏振信息不能被人眼或常规相机直接获得,因而无法在普通图像中呈现,但经过图像处理后可以将其提取出来,能同时获得各个偏振态的灰度图和不同观测点的详细偏振数据,可直观地反映物体表面的特征信息。

考虑到传统水下成像系统对目标探测及信号处理的能力已不能满足当今时代的应用需求,本文结合实际水下成像技术,提出一种新的水下成像结构,即采用液晶相位延迟器(LCVR)<sup>[15-16]</sup>辅助CCD获取偏振图像,并进行伪彩色处理,主要研究水下环境中偏振光在金属表面的反射特性和不同金属的偏振探测成像特征。

## 2 表面偏振反射原理及测量方法

### 2.1 金属表面反射原理

由于金属的电导率不为零,当光照射到金属表面时,会导致入射光能损耗;同时金属的自由电子被光波照射时会吸收光的能量并放出与原来光波相同频率的光,形成光的反射。该反射遵守折射定律和菲涅耳定律,金属的复折射率为

$$\bar{n} = n(1+jnk), \quad (1)$$

式中  $n$  为折射率,  $nk$  为损耗率<sup>[17]</sup>。若  $n_1$  和  $\theta_1$  分别为入射介质的折射率和入射角,则反射光中两个相互垂直的偏振反射分量,即  $S$  分量和  $P$  分量[分别对应于横电(TE)波和横磁(TM)波]的强度反射比和相位变化率分别为

$$R_s = \bar{r}_s * \bar{r}_s^* = \frac{(n_1 \cos \theta_1 - L) + M^2}{(n_1 \cos \theta_1 + L) + M^2}, \quad (2)$$

$$\vartheta_s = \arctan \left( \frac{2Mn_1 \cos \theta_1}{L^2 + M^2 - n_1^2 \cos^2 \theta_1} \right), \quad (3)$$

$$R_p = \bar{r}_p * \bar{r}_p^* =$$

$$\frac{[n^2(1-k^2)\cos \theta_1 - n_1 L] + (2n^2 k \cos \theta_1 - n_1 M)}{[n^2(1-k^2)\cos \theta_1 + n_1 L] + (2n^2 k \cos \theta_1 + n_1 M)}, \quad (4)$$

表 1 金属表面反射的偏振光

Table 1 Polarized light reflected on a metal surface

Item	Horizontal linearly polarized light	Vertical linearly polarized light	$45^\circ$ linearly polarized light	$-45^\circ$ linearly polarized light	Left circularly polarized light	Right circularly polarized light
$\chi_i$	0	$\infty$	1	-1	-i	i
$\chi_r$	0	$\infty$	$R_r \exp(i\vartheta)$	$R_r \exp(i\vartheta)$	$R_r \exp(-i\vartheta)$	$R_r \exp[i(-\vartheta/2)]$

由表 1 可知,当水平和垂线偏振光入射至金属表面时,反射光仍保持原来偏振状态不变,当圆偏振光或线偏振光以一定角度入射时,反射光变为椭

$$\vartheta_p = \arctan \left\{ \frac{2n_1 n^2 \cos \theta_1 [2kL - M(1 - k^2)]}{n^4 (1 + k^2)^2 \cos^2 \theta_1 - n_1^2 (L^2 + M^2)} \right\}, \quad (5)$$

式中  $L$  和  $M$  分别为与入射介质、反射介质折射率和入射角有关的两个辅助参量<sup>[18]</sup>。

由(2)~(5)式可知,金属的复折射率与光的入射角度共同决定了两垂直分量的反射系数和相位延时量的大小,反射能量的重新分配和特征相位的改变使入射的线偏振光一般变为椭圆偏振光,即金属在这一过程中作为“偏振转换器”对入射光的偏振信息进行了重新调节。椭圆偏振光可以表示为两垂直线偏振光的合成,为此将反射光简化为完全偏振光,反射光学系统可视为偏振光学系统,反射光可表示为

$$\mathbf{E} = \begin{bmatrix} \mathbf{E}_s \\ \mathbf{E}_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_{os} \exp(i\vartheta_s) \\ E_{op} \exp(i\vartheta_p) \end{bmatrix}. \quad (6)$$

令

$$\chi = \frac{\mathbf{E}_p}{\mathbf{E}_s} = \tan \alpha \exp(i\vartheta) = \tan \alpha \cos \vartheta + i \tan \alpha \sin \vartheta, \quad (7)$$

式中  $\tan \alpha$  为两分量的振幅比,  $\vartheta$  为竖直方向与水平方向的相位差。这样用一个复变函数就可以完整描述一个偏振光。用  $\chi_i$  和  $\chi_r$  分别表示入射光和反射光偏振态,当入射光经过金属反射时,偏振光与金属介质的相互作用规律可以用琼斯矩阵元素来表示。反射面的琼斯矩阵为

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} R_p \exp(-i\vartheta_p) & 0 \\ 0 & R_s \exp(-i\vartheta_s) \end{bmatrix}, \quad (8)$$

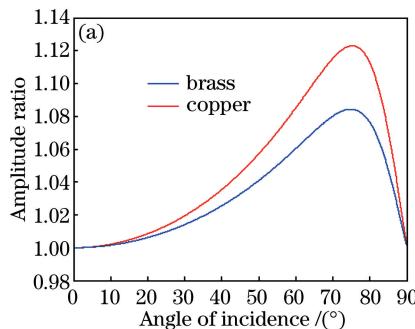
则经过金属面反射后,出射光的偏振态可表示为

$$\begin{aligned} \chi_r &= (J_{22}\chi_i + J_{21})/(J_{12}\chi_i + J_{11}) = \\ &\quad \frac{R_s \exp[i(\vartheta_p - \vartheta_s)]}{R_p} \chi_i = R_r \exp(i\vartheta) \chi_i, \end{aligned} \quad (9)$$

式中  $R_r = R_s/R_p$ ,  $\vartheta = \vartheta_p - \vartheta_s$ 。

(9)式为经金属反射后反射光和入射光的偏振信息对应关系,  $R_r \exp(i\vartheta)$  可视为该系统的偏振传递函数。不同偏振光经过该系统后偏振变化如表 1 所示。

以实验中用到的黄铜和紫铜及常用的氦氖激光器为例,模拟了 632 nm 激光照射下反射光的偏振特性,此时黄铜主折射率为 0.44450, 主吸收率为



3.5655; 紫铜主折射率为 0.27152, 主吸收率为 3.3979。不同入射角度时反射光的两垂直分量振幅及相位差模拟结果见图 1。

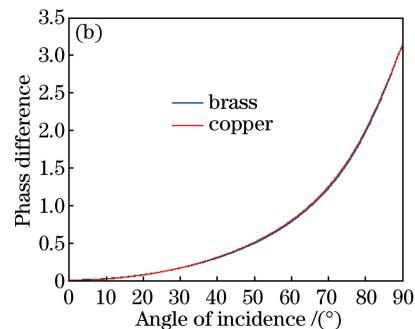
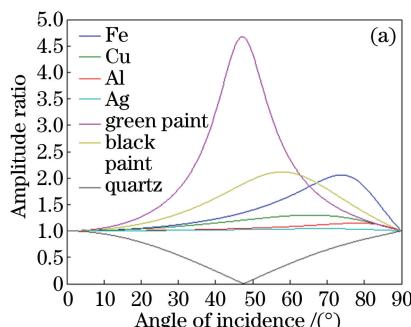


图 1 紫铜和黄铜的(a)振幅比与(b)相位差仿真结果

Fig. 1 Simulation results of (a) amplitude ratio and (b) phase difference of copper and brass

黄铜和紫铜材质相近,其反射光相位差非常接近,紫铜两分量相位差值略高于黄铜;而振幅比趋势相同,入射角达到主入射角时,振幅比达到最大值,此后随着入射角的增大快速减小到 1。主入射角条



件下,黄铜振幅比明显高于紫铜。为了研究不同材质的反射,进一步模拟了铁、黄铜、银等金属,石英为代表的岩石和绿漆、黑漆为代表的涂层材料的反射情况,结果如图 2 所示。

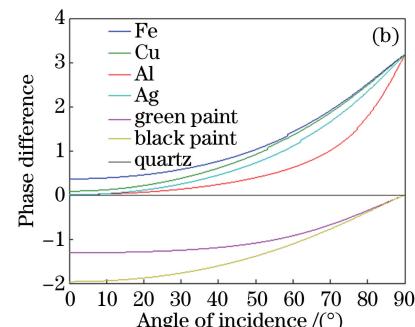


图 2 不同物质的反射偏振分量的(a)振幅比和(b)相位差图

Fig. 2 (a) Amplitude ratio and (b) phase difference of the reflected polarization component of different materials

由图 2 可知,当激光束在材料表面发生反射时,能量在 S 和 P 方向上重新进行分配;目标材质不同,则能量分配的规律也存在很大差异<sup>[4]</sup>。金属和非金属,尤其是涂层反射光分量在相位差方面的差异更为明显。上述模拟结果为材料偏振图像的分析和重建算法奠定了基础。

## 2.2 表面反射测量方法

斯托克斯参量是光学偏振态的数学表示<sup>[3,19,20]</sup>。斯托克斯引入 4 个量表示偏振态的参量,即:

$$S = \begin{bmatrix} I = I_0 + I_{90} = I_{45} + I_{-45} = I_l + I_r \\ Q = I_0 - I_{90} \\ U = I_{45} - I_{-45} \\ V = I_r - I_l \end{bmatrix}, \quad (10)$$

式中: $I_0$ 、 $I_{90}$ 、 $I_{45}$  和  $I_{-45}$  分别表示放置在光波传播路径上一理想偏振片在  $0^\circ$ 、 $90^\circ$ 、 $45^\circ$  和  $-45^\circ$  方向上的线偏振光; $I_l$  和  $I_r$  分别表示左旋和右旋圆偏振光的光强; $I$  表示光波的总强度; $Q$  表示 S 方向上线偏振光的强度差; $U$  表示  $+\pi/4$  方向与  $-\pi/4$  方向上线偏振光的强度差; $V$  表示右旋还是左旋圆偏振光分量占优势。由(10)式可知,只要测量出  $I_0$ 、 $I_{90}$ 、 $I_{45}$ 、 $I_{-45}$ 、 $I_l$  和  $I_r$  这 6 个偏振光强量就可以计算出斯托克斯的 4 个参量。偏振度  $P$ <sup>[21]</sup> 和偏振角  $\theta$ <sup>[22]</sup> 分别表示为

$$P = \frac{\sqrt{Q^2 + U^2 + V^2}}{I}, \quad (11)$$

$$\theta = \frac{1}{2} \arctan\left(\frac{U}{Q}\right). \quad (12)$$

### 3 实验结果

#### 3.1 实验装置

对传统水下成像系统适当改进之后, 搭建如图 3 所示的装置。

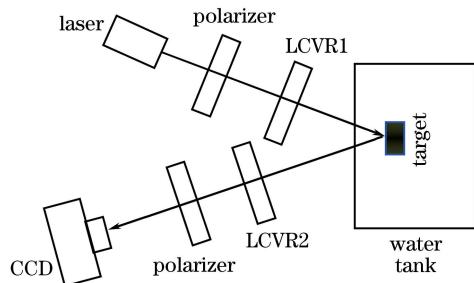


图 3 成像系统结构示意图

Fig. 3 Schematic of the imaging system

线偏振激光器发出的光经过检偏器并准直扩束后入射到目标物上, 使之完全被照亮, 用 CCD 摄像头在相应的方向上接收反射光, 先得到样品的原始图像。为测量物体反射光的偏振态, 在 CCD 摄像头前放置一与检偏器同向偏振片和相位延迟器, 先调节入射光路中的液晶相位延迟器 1(LCVR1), 分别获得水平线偏振光、 $45^\circ$  线偏振光、竖直线偏振光, 然后在每种偏振光下, 调节接受光路中的 LCVR2, 分别得到快轴为  $0^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $90^\circ$  的目标反射光图像, 该图像由 CCD 相机探测接收。这样可以分别取偏振方

向为  $0^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $90^\circ$  的 3 幅不同的偏振图像。在 MATLAB 实验平台上编写程序, 得到图像的数据矩阵, 经计算得出斯托克斯参量, 进而获取偏振度和偏振角图像。

与之前的水下成像光路相比, 引入液晶相位延迟器后可以完全去除采集不同角度偏振图像时传统偏振片的机械动作, 适应水下无人操作环境, 消除偏振片机械转动带来的影响及操作或震动带来的误差。为同时体现金属-金属及金属-非金属之间的差异, 将黄铜片下端涂铅笔涂层。同时, 为了减少金属表面粗糙度等因素的影响<sup>[23-26]</sup>, 将目标物统一处理至 A1 级表面, 图 2(a) 中入射角为  $60^\circ$  时铜与涂层的振幅比差别较大, 故入射角选为  $60^\circ$ 。为体现水体衰减对图像的影响<sup>[27-28]</sup> 且与模拟保持一致, 光源采用 632 nm 线偏振激光。

#### 3.2 实验结果

处理 CCD 采集到的图像以得到其对应偏振度与偏振角图像, 并将之映射至 HSV 空间<sup>[29-30]</sup> 中。人眼只能分辨几十种不同深浅的灰度级, 却能分辨几千种不同的颜色。因此将一个波段或单一的黑白图像变换为彩色图像, 从而把人眼不能区分的微小灰度差别显示为明显的色彩差异, 更有利于材质区分和提取有用信息, 也能为图像分割<sup>[31-32]</sup>、伪色彩增强<sup>[33]</sup> 等后续处理提供便利, 结果如图 4 和图 5 所示。

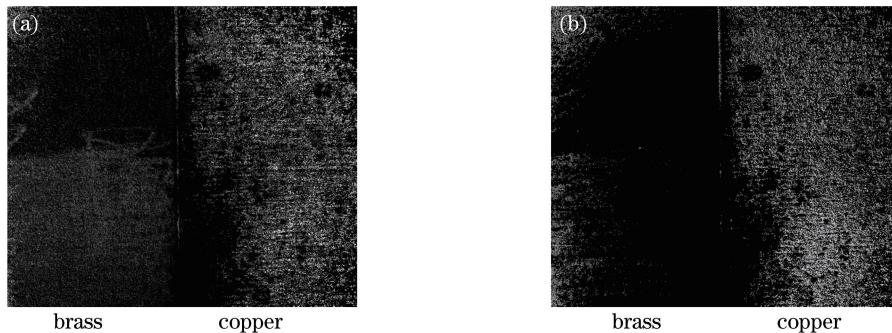


图 4 黄铜和紫铜的(a)偏振度与(b)偏振角图像

Fig. 4 (a) Polarization degree and (b) polarization angle image of brass and copper

由理论分析可知, 紫铜、黄铜和铅笔涂层在偏振度和偏振角图像上会存在一定差异, 图 5 结果证实了之前的理论推测, 与仿真模拟结果相符, 能够实现黄铜、紫铜及铅笔涂层的区别。为了更清楚地表征上述 3 种物体因材质区别引起的颜色差异, 引入 Lab 空间。Lab 空间是一种与设备无关的颜色系统, 也是一种基于生理特征的颜色系统, 是用数字化的方法来描述人的视觉感应。Lab 空间的  $L$  表示

像素的亮度分量, 取值范围为  $[0, 100]$ , 表示从纯黑到纯白的范围;  $a$  表示从红色到绿色的范围, 取值范围为  $[-128, 127]$ ;  $b$  表示从黄色到蓝色的范围, 取值范围为  $[-128, 127]$ 。

从图 5 中截取 3 种材质特征颜色部分并转换至 Lab 空间绘制其颜色分布散点图, 图中横坐标和纵坐标分别为  $L=50$  时  $a$  轴和  $b$  轴相对值, 不同位置处其所代表的颜色也不同, 结果如图 6 所示。

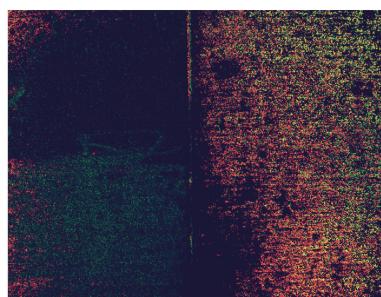


图 5 (a)黄铜和(b)紫铜的 HSV 图

Fig. 5 HSV images of (a) brass and (b) copper

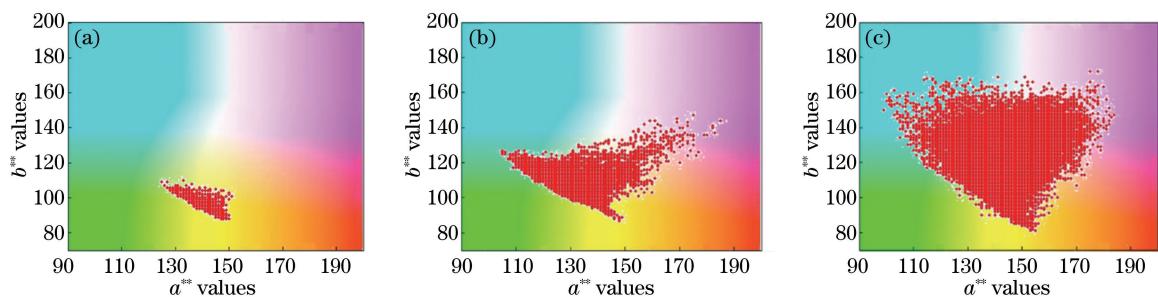


图 6 (a)黄铜、(b)铅笔和(c)紫铜的颜色分布散点图

Fig. 6 Scatterplot of the color distribution of (a) brass, (b) pencil and (c) copper

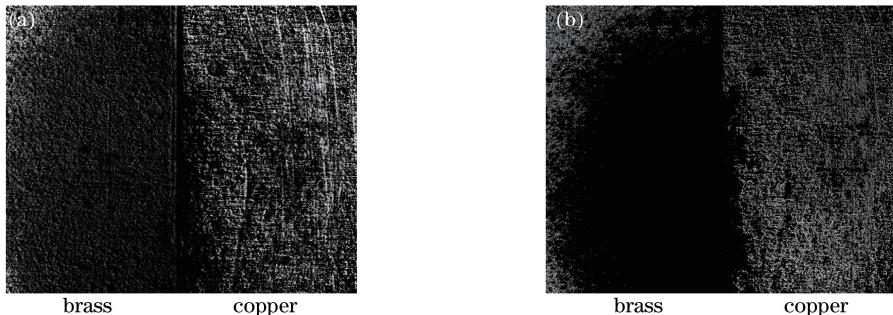


图 7 黄铜和紫铜的(a)偏振度与(b)偏振角图像

Fig. 7 (a) Polarization degree and (b) polarization angle image of brass and copper

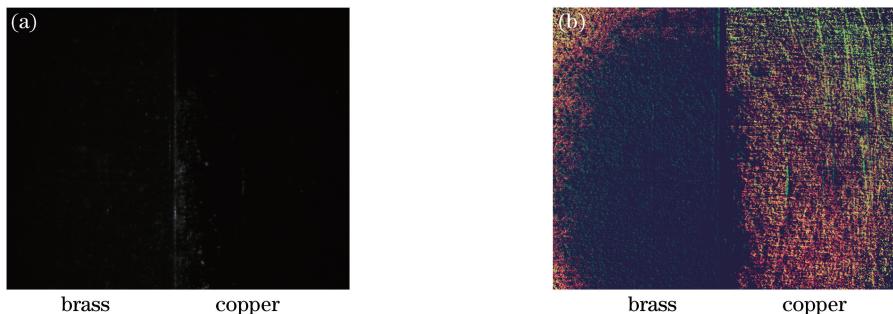


图 8 黄铜和紫铜的(a)原图和(b) HSV 图

Fig. 8 (a) Original image and (b) HSV image of brass and copper

比较图 5 和图 8 可知,选择适当的入射角度后,黄铜部分成像质量得到改善,偏振度、偏振角图像中黄铜、紫铜之间也有了明显的区别;图 6 和图 9 中黄铜和紫铜在 Lab 颜色平面内分布大体相同。综上

由图 6 可以看出,3 种物体在 Lab 颜色平面内分布的位置和面积大小存在明显差异,可以很好地定量反映出黄铜、铅笔和紫铜在 Lab 空间中对应颜色的分布特征,表明颜色分布与材质相关且一一对应。

为进一步提高成像质量和黄铜的分辨率,根据图 1(a)数值模拟的结果,入射角为 75°时黄铜、紫铜两垂直分量振幅比差值最大。调整入射角度至 75°,只对黄铜、紫铜进行实验,结果如图 7~9 所示。

所述,借由 HSV 图像可以轻易完成材料的区分,引入 Lab 颜色分布散点图则能清晰表征颜色差异,有利于实现物体材质的智能识别。

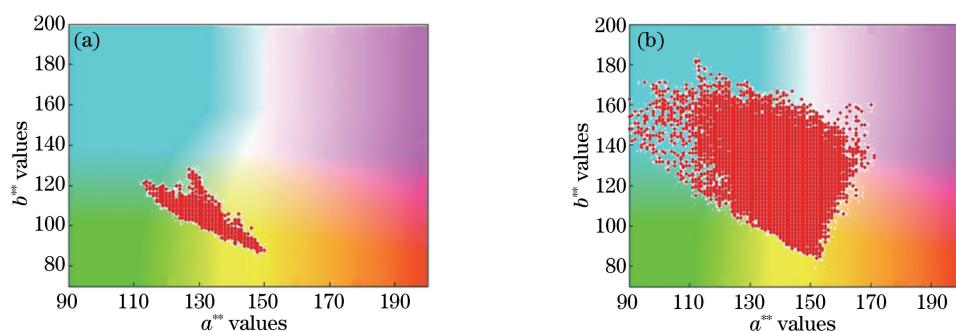


图 9 (a) 黄铜和(b)紫铜的颜色分布散点图

Fig. 9 Scatterplot of the color distribution of (a) brass and (b) copper

## 4 结 论

针对目前水下成像技术存在的问题,采用偏振技术改进了传统成像仪器的光学部分。偏振信息是不同于辐射信息的目标的另外一种特征表述,对于材料不同,或者相同基材的不同合金,在普通图像中可能因为两者颜色或者亮度等信息十分接近而难以区分,但在偏振图像中却可以很容易地区分开来。因此,利用偏振成像技术可以在复杂的背景下检测出更多有用的信息。采用 MATLAB 软件模拟了不同材质的反射偏振特性,利用新的成像装置获取偏振图像,并在 MATLAB 下计算得到了目标的斯托克斯参量、偏振度和偏振角图像,并对原图像与偏振图像进行了对比。结果表明,偏振度和偏振角图像能提高水下成像效果,且能体现目标的材质信息;采用 HSV 算法彩色增强处理后更有利于人眼对物体材质的识别,对水下成像质量有较大改善;转换至 Lab 空间后能一定程度上实现材质识别;但对不同的材料图像进行增强时要有针对性地选择偏振度或偏振角图像。

## 参 考 文 献

- [1] Schettini R, Corchs S. Underwater image processing: State of the art of restoration and image enhancement methods [J]. *Eurasip Journal on Advances in Signal Processing*, 2010, 2010 (1): 746052.
- [2] Mclean E A, Burris H R Jr, Strand M P. Short-pulse range-gated optical imaging in turbid water[J]. *Applied Optics*, 1995, 34(21): 4343-4351.
- [3] Guan J G, Zhu J P, Tian H, et al. Real-time polarization difference underwater imaging based on Stokes vector [J]. *Acta Physica Sinica*, 2015, 64 (22): 224203.
- [4] Liao Y B. *Polarization optics* [M]. Beijing: Science Press, 2003.
- [5] Xu C J, Zhao J S, Cai Y, et al. Several schemes of infrared polarization imaging [J]. *Infrared Technology*, 2009, 31(5): 262-266.
- [6] Demos S G, Alfano R R. Optical polarization imaging [J]. *Applied Optics*, 1997, 36(1): 150-155.
- [7] Fu X. Study of under-well polarization optics imaging detection technology [D]. Qingdao: China University of Petroleum(East China), 2010.
- [8] Shi Z H. Imaging polarization measurement technology and its application [J]. *Infrared*, 2002, (4): 1-5.
- [9] Harchanko J S, Chenault D B. Water-surface object detection and classification using imaging polarimetry [J]. *Proceedings of SPIE*, 2005, 5888: 588815.
- [10] Liu G L, Li Y F, Cameron B D. Polarization-based optical imaging and processing techniques with application to the cancer diagnostics [J]. *Proceedings of SPIE*, 2002, 4617: 208-220.
- [11] Ghosh N, Banerjee A, Soni J. Turbid medium polarimetry in biomedical imaging and diagnosis [J]. *European Physical Journal Applied Physics*, 2011, 54 (3): 184-187.
- [12] Geyer E H, Jockers K, Kiselev N N, et al. A novel quadruple beam imaging polarimeter and its application to Comet Tanaka-Machholz 1992 X [J].

- Astrophysics and Space Science, 1996, 239(2): 259-274.
- [13] Oliva E. Wedged double Wollaston, a device for single shot polarimetric measurements [J]. Astronomy & Astrophysics Supplement, 1997, 123(3): 589-592.
- [14] Kawabata K S, Nagae O, Chiyonobu S, et al. Wide-field one-shot optical polarimeter: HOWPol [J]. Proceedings of SPIE, 2008, 7014: 70144L.
- [15] Yan Z C. Research on laser polarization modulation technology based on LCVR [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2016.
- 闫增成. 基于 LCVR 的激光偏振态调制技术研究 [D]. 长春: 长春理工大学, 2016.
- [16] Xue P, Wang Z B, Zhang R, et al. Highly efficient measurement technology based on hyperspectropolarimetric imaging [J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(8): 0811001.
- 薛鹏, 王志斌, 张瑞, 等. 高光谱全偏振成像快捷测量技术研究 [J]. 中国激光, 2016, 43(8): 0811001.
- [17] Chen J. Optical electromagnetic theory[M]. Beijing: Science Press, 2005.
- 陈军. 光学电磁理论 [M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- [18] Yang Y Y, Cui Z Z, Wang L, et al. Reflective laser polarization characteristics of metal target surface in the short-range detection[J]. Science & Technology Review, 2013, 31(11): 28-32.
- 杨雨迎, 崔占忠, 王玲, 等, 金属目标表面的反射激光偏振特性 [J]. 科技导报, 2013, 31(11): 28-32.
- [19] Li D L, Zhu H F, Pei H Y. Underwater imaging technology based on image fusion [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2008, 32(4): 157-160.
- 李代林, 朱化凤, 裴红艳. 基于图像融合的水下成像技术 [J]. 中国石油大学学报, 2008, 32(4): 157-160.
- [20] Yu G P, Wang X F. Researches on polarizing image [J]. Physics Experimentation, 2009, 29(7): 38-39.
- 于国萍, 王晓峰. 偏振图像的研究 [J]. 物理实验, 2009, 29(7): 38-39.
- [21] Tang R Y, Yu G P, Wang X F. Acquisition method of polarization image in natural lighting environment [J]. Journal of Wuhan University (Natural Science Edition), 2006, 52(1): 59-63.
- 唐若愚, 于国萍, 王晓峰. 自然光照下偏振度图像的获取方法 [J]. 武汉大学学报(理学版), 2006, 52(1): 59-63.
- [22] Peng Q H, Yu G P, Tang R Y, et al. Polarization characteristic of reflected light under natural lighting [J]. Optics & Optoelectronic Technology, 2006, 4(2): 65-68.
- 彭钦华, 于国萍, 唐若愚, 等. 自然光照下反射光的偏振特性研究 [J]. 光学与光电技术, 2006, 4(2): 65-68.
- [23] Bai S K, Duan J, Lu Y Z, et al. Experimental study on polarization imaging characteristics of various materials [J]. Journal of Applied Optics, 2016, 37(4): 510-516.
- 白思克, 段锦, 鲁一倬, 等. 不同材质的偏振成像特性实验研究 [J]. 应用光学, 2016, 37(4): 510-516.
- [24] Li Y N, Sun X B, Qiao Y L, et al. Experiment investigation of the Mueller matrix for aluminium sample [J]. Journal of Atmospheric and Environmental Optics, 2010, 5(3): 203-208.
- 李雅男, 孙晓兵, 乔延利, 等. 铝板的偏振反射 Mueller 矩阵实验研究 [J]. 大气与环境光学学报, 2010, 5(3): 203-208.
- [25] Sun X M, Wang H H, Shen J, et al. Study on polarized light scattering by aerosol over ocean [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(4): 040101.
- 孙贤明, 王海华, 申晋, 等. 海洋背景下气溶胶的偏振光散射特性研究 [J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(4): 040101.
- [26] Zhang S, Zhan J T, Bai S K, et al. Influence of smoke concentration on transmission characteristics of polarized light [J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(7): 0729001.
- 张肃, 战俊彤, 白思克, 等. 烟雾浓度对偏振光传输特性的影响 [J]. 光学学报, 2016, 36(7): 0729001.
- [27] Wang H B, Liao Y, Shen J, et al. Method of underwater polarization image fusion based on hierarchical and multi-scale transform [J]. Acta Photonica Sinica, 2014, 43(5): 0510004.
- 王慧斌, 廖艳, 沈洁, 等. 分级多尺度变换的水下偏振图像融合法 [J]. 光子学报, 2014, 43(5): 0510004.
- [28] Zhao S C. Study on depolarization characteristics of polarized light transmission in seawater channel [J]. Science & Technology Information, 2014, 12(19): 9-10.
- 赵士成. 偏振光在海水信道中传输的退偏特性研究 [J]. 科技资讯, 2014, 12(19): 9-10.
- [29] Cai S D, Yang F. Color image segmentation based on HSV space and rough-set theory [J]. Opto Electronic

- Technology, 2011, 31(1): 5-9.
- 蔡式东, 杨芳. 一种基于 HSV 空间和粗糙集的彩色图像分割方法[J]. 光电子技术, 2011, 31(1): 5-9.
- [30] Yang T, Zhang S L. Approach of vehicle plate extraction based on HSV color space and SIFT feature [J]. Application Research of Computers, 2011, 28(10): 3937-3939, 3976.
- 杨涛, 张森林. 一种基于 HSV 颜色空间和 SIFT 特征的车牌提取算法[J]. 计算机应用研究, 2011, 28(10): 3937-3939, 3976.
- [31] Zhang G Q, Li Z M, Li X W, et al. Research on color image segmentation in HSV space [J]. Computer Engineering and Applications, 2010, 46(26): 179-181.
- 张国权, 李战明, 李向伟, 等. HSV 空间中彩色图像分割研究[J]. 计算机工程与应用, 2010, 46(26): 179-181.
- [32] Ge X H. Rough set based fuzzy clustering and application in image segmentation[D]. Xi'an: Xidian University, 2012.
- 葛小华. 基于粗糙集的模糊聚类及其图像分割应用[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2012.
- [33] Li Y M. An edge detection method based on the Hessian matrix[J]. Laser Journal, 2014, 35(5): 27-30.
- 李永明. 基于 Hessian 矩阵的边缘检测方法[J]. 激光杂志, 2014, 35(5): 27-30.