

基于Stokes矢量的实时偏振差分水下成像研究*

管今哥¹⁾ 朱京平^{1)2)†} 田恒¹⁾ 侯洵²⁾

1)(西安交通大学电子科学与技术系, 电子物理与器件教育部重点实验室, 西安 710049)

2)(西安交通大学电子科学与技术系, 陕西省信息光子技术重点实验室, 西安 710049)

(2015年5月1日收到; 2015年7月3日收到修改稿)

偏振差分水下成像能够有效地克服光散射效应造成的图像退化问题, 在水下物体探测与识别领域具有重要应用价值. 传统的偏振差分方法靠光学检偏器的无规则机械转动来实现对散射背景的共模抑制, 限制了其在水下成像过程中的实时探测性能. 本文通过分析偏振差分探测原理来建立偏振差分成像模型, 从理论上提出了基于Stokes矢量的计算偏振差分水下实时成像系统, 并进行了实验验证. 研究表明, 基于Stokes矢量的计算偏振差分成像不仅与传统的偏振差分方法具有相同的水下探测效果, 更重要的是可以实现快速成像过程. 该方法可以应用到目前的偏振成像仪器系统, 实现无人-机互动的自动化实时偏振差分水下成像, 进一步提高水下物体探测与识别的效率.

关键词: 水下成像, 偏振, 散射, 光学信息处理

PACS: 42.25.Dd, 42.25.Ja, 42.30.Sy, 42.30.Va

DOI: 10.7498/aps.64.224203

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具有非常重要的应用, 如最近发生的MH370客机残骸水下搜寻工作. 光学成像系统所获得的图像质量受水体散射效应的影响比较明显, 很难达到令人满意的成像效果^[1]. 一方面, 水体对光的散射作用使得包含物体信息的光线不能进行理想成像, 导致水下目标景物模糊; 另一方面, 背景散射光线会与成像光线叠加在一起形成噪声, 降低了图像对比度.

水体对光的散射作用是一个比较复杂的过程, 如何消除散射效应对水下成像的影响是一项富有挑战性的工作. 为此, 国内外许多研究机构对水下光散射现象进行了一系列的理论^[2,3]与实验研究, 包括: 如何使水中的散射光线聚焦并进行理想成像^[4]; 如何将来自水体的散射光线与成像光线进行区分, 提高图像对比度, 如时间门成像技术^[5]、偏振

滤波技术^[6,7]以及鬼成像等^[8].

本文主要研究偏振水下成像, 该技术操作简单, 成本较低, 受到越来越多科学家的青睐^[9]. 其中基于海洋生物视觉特性的偏振差分水下成像^[10-12]研究比较系统且成像效果明显; 但传统的偏振差分成像依靠光学检偏器的无规则机械转动来实现对背景的共模抑制, 耗时长, 限制了其在水下的实时探测性能.

针对以上问题, 本文通过分析偏振差分探测原理和建立偏振差分水下成像物理模型, 将Stokes矢量引入所建模型, 从理论上提出了基于Stokes矢量的计算偏振差分水下实时成像系统, 并通过实验验证了该方法的可靠性.

2 偏振差分水下成像理论

偏振差分水下成像系统通过获取相互正交的线偏振图像, 并利用正交偏振图像的差异来实现对

* 国家自然科学基金(批准号: 61205187)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: jpzhu@mail.xjtu.edu.cn

物体的探测与识别. 偏振差分图像如(1)式所示:

$$I_{pd}(x, y) = I_{//}(x, y) - I_{\perp}(x, y), \quad (1)$$

其中, $I_{//}(x, y)$ 与 $I_{\perp}(x, y)$ 分别表示偏振方向相互正交的图像强度分布; (x, y) 表示偏振图像中像素的坐标位置.

2.1 偏振差分水下成像原理及物理模型

在水下图像复原与特征增强的主动探测过程中, 探测器接收到的光辐射主要来自背景的后向散射光与来自目标的光组成^[13]. 我们认为偏振差分探测的原理是基于目标与背景的光矢量振动方

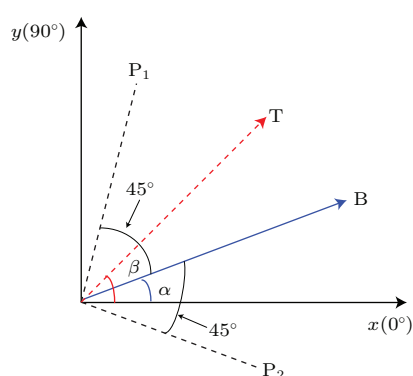


图1 (网刊彩色) 偏振差分探测原理. α , 背景光(B) 偏振角; β , 目标光(T) 偏振角; P_i ($i = 1, 2$), 检偏器

Fig. 1. (color online) The detection principle of polarization difference imaging. α , polarization angle of light from background (B); β , polarization angle of light from target (T); P_i ($i = 1, 2$), polarization analyzer.

向差异来滤除背景散射噪声, 就此建立了利用偏振差分方法进行水下目标探测与识别的物理模型, 如图1所示.

根据马吕斯定律可知, 当背景光偏振方向与相互正交的检偏器透过方向均为 45° 时, 偏振差分成像通过光学检偏器的共模抑制作用来滤除背景. 这在2.2节中会进行具体的论证.

2.2 基于Stokes矢量的计算偏振差分水下成像理论

Stokes 矢量 $\mathbf{S} = [I, Q, U, V]^T$ 是目前国际上最常用的描述光偏振态的方法, 其中 I 代表光的强度, Q 代表 0° 与 90° 偏振方向光的强度差值, U 代表 45° 与 135° 偏振方向光的强度差值, V 代表右旋偏振光与左旋偏振光的强度差值. 光矢量的振动方向可用偏振角 φ 来表示:

$$\varphi = \frac{1}{2} \arctan(U/Q). \quad (2)$$

偏振差分水下成像原理是基于背景散射光与目标光的偏振方向差异对背景进行共模抑制. 目前的偏振成像仪器可以实时获取光的 Stokes 矢量^[14], 为此我们尝试将 Stokes 矢量引入偏振差分成像物理模型来实现实时水下目标探测与识别.

由偏振光学知识^[15]可知, 与背景光偏振方向 α 分别成 45° 且透过方向相互正交的检偏器所对应的穆勒矩阵组可表示为

$$\mathbf{M}(\theta_{//}) = \begin{pmatrix} 1 & -\sin(2\alpha) & \cos(2\alpha) & 0 \\ -\sin(2\alpha) & \sin^2(2\alpha) & -\sin(2\alpha)\cos(2\alpha) & 0 \\ \cos(2\alpha) & -\sin(2\alpha)\cos(2\alpha) & \cos^2(2\alpha) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad (3a)$$

$$\mathbf{M}(\theta_{\perp}) = \begin{pmatrix} 1 & \sin(2\alpha) & -\cos(2\alpha) & 0 \\ \sin(2\alpha) & \sin^2(2\alpha) & -\sin(2\alpha)\cos(2\alpha) & 0 \\ -\cos(2\alpha) & -\sin(2\alpha)\cos(2\alpha) & \cos^2(2\alpha) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}. \quad (3b)$$

当光与物质相互作用时, 入射光偏振态 $\mathbf{S}_{in}$ 与作用后的光偏振态 $\mathbf{S}_{out}$ 之间的关系可由斯托克斯-穆勒形式得到

$$\mathbf{S}_{out} = \mathbf{M} \cdot \mathbf{S}_{in}, \quad (4)$$

其中 $\mathbf{M}$ 代表物体的穆勒矩阵.

根据 Stokes 矢量的物理意义, 并结合(4)式可知, 光经过相互正交检偏器调制后, 其光强分别变为

$$I_{//}(i) = I_i - \sin(2\alpha) \cdot Q_i + \cos(2\alpha) \cdot U_i, \quad (5a)$$

$$I_{\perp}(i) = I_i + \sin(2\alpha) \cdot Q_i - \cos(2\alpha) \cdot U_i, \quad (5b)$$

上式中符号 i 表示背景光(B)或目标光(T), 两者具有相同的变换形式.

根据(1)与(5)式可得传统的偏振差分成像结果为

$$I_{pd}(B) = I_{//}(B) - I_{\perp}(B) = 0, \quad (6a)$$

$$\begin{aligned} I_{pd}(T) &= I_{//}(T) - I_{\perp}(T) \\ &= 2(\cos(2\alpha) \cdot U_T - \sin(2\alpha) \cdot Q_T). \end{aligned} \quad (6b)$$

可见在偏振差分成像过程中, 背景散射光被滤除而目标信号得以保留.

由(2)式可知, 背景散射光具有如下变换形式

$$Q_B - \frac{1}{\tan(2\alpha)} U_B = 0. \quad (7)$$

在光学信息处理过程中, 我们对目标信号进行与(7)式相同的变换可得

$$\begin{aligned} Q_T - \frac{1}{\tan(2\alpha)} U_T \\ = -\frac{1}{\sin(2\alpha)} (\cos(2\alpha) \cdot U_T - \sin(2\alpha) \cdot Q_T). \end{aligned} \quad (8)$$

(8)式便是基于Stokes矢量的计算偏振差分水成像方法得到的结果, 其与(6b)式在括号内具有相同的表达式. 由于背景光偏振方向 α 为一固定常数, 因而在图像处理的范畴内, 基于Stokes矢量的计算偏振差分成像与传统的偏振差分方法获得的图像具有相同的图像对比度.

通过以上分析, 基于Stokes矢量的计算偏振差分成像方法如下:

$$I_{\text{Stokes-pd}} = Q - \gamma U, \quad (9)$$

其中 γ 为权重系数. 结合(7)式可知当 $\gamma = 1/\tan(2\alpha)$ 时, 背景可通过共模抑制作用被完全滤除, 我们把该情况下的 γ 称为最优权重系数 γ_{optimum} .

2.3 传统的偏振差分与基于Stokes矢量的计算偏振差分方法比较

偏振水下成像过程中背景散射光的偏振方向并不确定, 传统的偏振差分方法通过检偏器的无规则机械转动来实现对背景的共模抑制; 而计算偏振差分成像只需要按照(8)式对Stokes矢量中的线偏振元素进行快捷的程序处理便可以对水下目标进

行探测与识别, 在理论上实现了实时的偏振差分成像, 如图2所示.

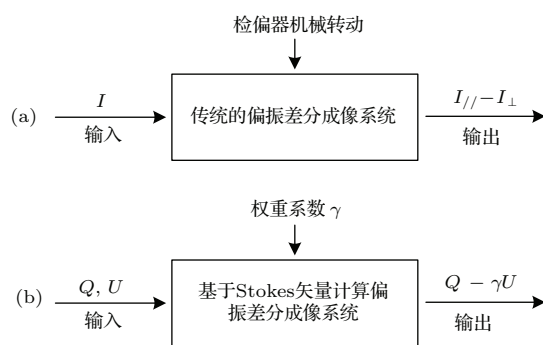


图2 (a) 传统的偏振差分系统与 (b) 基于Stokes矢量的计算偏振差分系统信息处理过程的比较

Fig. 2. A comparison of information processing using (a) conventional polarization difference method and (b) computational polarization difference imaging based on Stokes vector.

3 实验验证

3.1 实验系统

基于Stokes矢量的计算偏振差分水成像系统的基本组成如图3所示. 氦氖激光经过光衰减器、扩束器以及起偏器的综合作用, 形成直径为19 mm的线偏振光照射到含有10%脂肪乳溶液的5 cm × 5 cm × 5 cm 石英比色皿中, 入射光的偏振态为 $[1, 0, 1, 0]^T$. 散射介质中所包含物体为贴有两块相同尺寸1.5 mm × 7.5 mm 铝条的10 mm × 10 mm 尺寸砂纸, 其距离容器前壁为2.3 cm. 滤波片用来限制其他波长范围的光进入探测器, 检偏器可以检测特定偏振方向的散射光, 光阑用来减小环境光的影响. 灰度级为8 bit 的电荷耦合器件 (CCD) 相机用来获取水下物体的图像, 其灰度的动态显示范围由光衰减器和光阑共同进行控制.

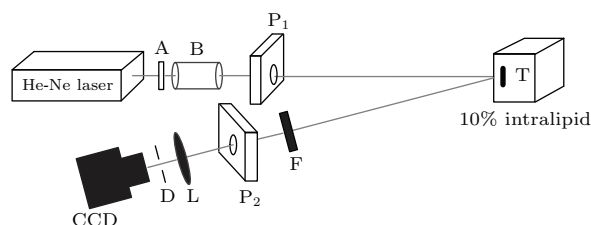


图3 偏振差分水成像系统. A, 光衰减器; B, 光扩束器; P₁, 起偏器; T, 水下目标; F, 滤波片; P₂, 检偏器; L, 汇聚透镜; D, 光阑

Fig. 3. Experimental setup for underwater polarization-difference imaging. A, attenuator; B, beam expander; P₁, polarization generator; T, underwater target; F, filter; P₂, polarization analyzer; L, lens; D, diaphragm.

3.2 实验结果与讨论

在水下偏振成像实验中, 目标与 CCD 相机之间的“距离”采用平均散射次数 N 来表示^[16], 其计算形式为 $N = L/TMFP$, 其中 L 为目标到光源一侧石英比色皿前壁的距离, $TMFP$ 为光子在散射介质中的平均传输自由程。

图 4 对不同散射情况下传统的强度成像与基于 Stokes 矢量的计算偏振差分成像的效果进行了比较. 图 4(a) 与图 4(b) 分别对应平均散射次数 $N = 0.26$ 与 $N = 2.79$ 的情况, (i) 与 (ii) 分别表示普通强度图像与计算偏振差分方法获得的图像, (iii) 则显示了与图像中水平直线相对应的像素强度数值曲线. 为充分利用 CCD 相机的灰度显示范围, 强度图像与计算偏振差分图像均需做归一化处理^[10].

比较两组图 4(i) 与图 4(ii) 可知, 低散射 ($N = 0.26$) 与高散射 ($N = 2.79$) 情况下, 偏振差分方法获得的图像质量均要优于普通图像. 尤其是在 $N = 2.79$ 时, 由于背景散射光叠加在目标信号中, 传统的强度成像已不能观察出铝条与砂纸之间的差异 (如图 4(b)-(i) 所示); 而偏振差分成像则根据目标与背景光偏振方向的差异减小了散射光的影响, 增加了铝条与砂纸之间的区分程度 (如图 4(b)-(ii) 所示).

两幅图 4(iii) 进一步从数值上验证了强度成像与偏振差分成像的差异. 与图中水平线相对应的数值强度曲线的峰谷分别代表铝条与砂纸信息. 在较低散射情况下, 两者均可以实现铝条与砂纸之间的辨别, 且前者图像中谷的强度要低于后者 (如图 4(a)-(iii) 所示). 这是由于砂纸表面比较粗糙, 对入射光偏振态具有破坏作用^[17], 从而经过偏振差分处理后其强度要减弱; 而铝条的表面相对光滑, 对入射偏振光具有保偏振作用, 经过偏振差分处理后其信息得以保留. 在较高的散射情况下, 介质对光的散射作用使得强度数值曲线中的峰与谷已无法区分, 而偏振差分数值曲线中峰与谷之间的差异仍可以观察到 (如图 4(b)-(iii) 所示).

为系统研究基于 Stokes 矢量的计算偏振差分方法进行水下成像的效果, 我们定量计算了不同散射情况所对应的铝条与砂纸之间的对比度 C , 其计算形式为 $C = (I_{\max} - I_{\min}) / (I_{\max} + I_{\min})$, 其中 $I_{\max}$ 与 $I_{\min}$ 分别代表图 4 中方形区域内与铝条和

砂纸部分相对应的强度平均值, 对比度的计算结果如图 5 所示.

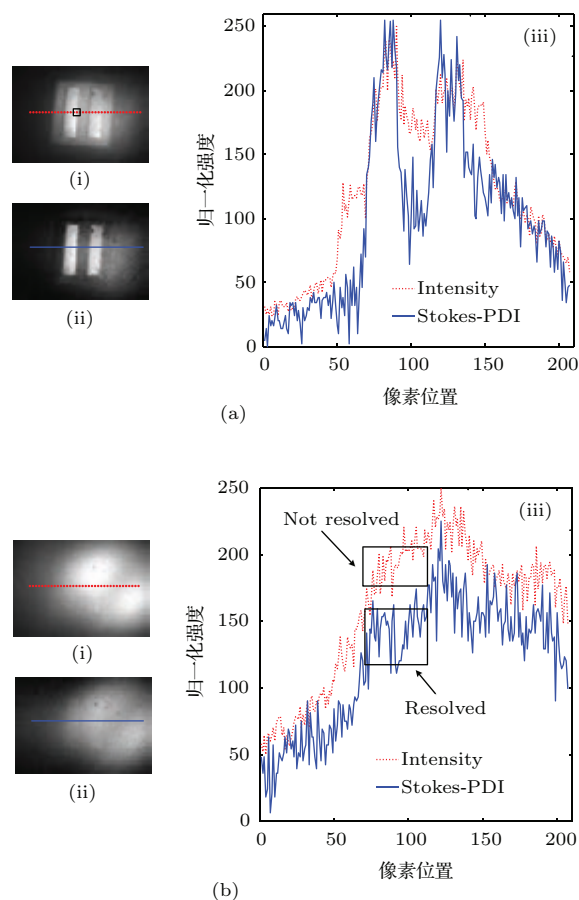


图 4 (网刊彩色) (a) $N = 0.26$ 与 (b) $N = 2.79$ 时普通图像 (Intensity) 与基于 Stokes 矢量的计算偏振差分图像 (Stokes-PDI) 比较 (i) 强度成像; (ii) 偏振差分成像; (iii) 数值曲线

Fig. 4. (color online) A comparison of regular imaging (Intensity) and computational polarization-difference based on the Stokes vector (Stokes-PDI) in the scattering case of (a) $N = 0.26$ and (b) $N = 2.79$: (i) regular imaging; (ii) polarization-difference imaging; (iii) curves.

由图 5 可以看到, 当光子平均散射次数 N 由 0.26 变为 2.79 时, 强度图像的对比度由 0.40 降为 0, 偏振差分图像的对比度则由 0.49 降为 0.08. 水体的散射作用使得两种图像的对比度均随着散射程度的增加而降低, 但偏振差分图像的对比度始终高于强度图像的对比度. 尤其当平均散射次数增加到 2.79 时, 强度图像中铝条与砂纸背景之间的差异已无法辨别; 而偏振差分图像仍可在一定程度上将两者区分. 以上讨论表明在进行水下物体探测与识别时, 偏振差分成像与强度成像相比, 可以有效地提高水下图像的对比度以及探测距离.

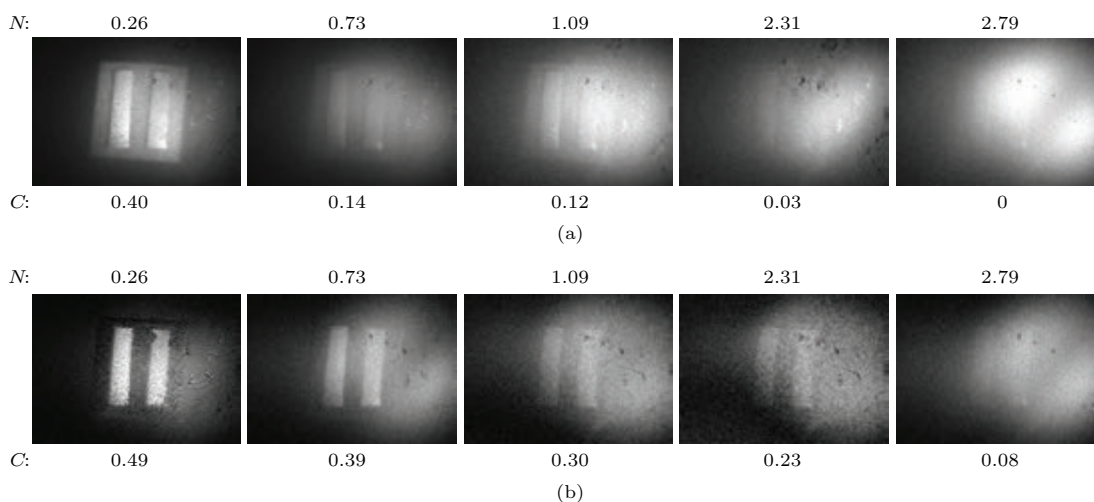


图5 (a) 普通图像与(b) 基于 Stokes 矢量的计算偏振差分图像对比度比较. N , 平均散射次数; C , 图像对比度
Fig. 5. A comparison of the image contrasts using (a) regular imaging and (b) computational polarization-difference imaging based on the Stokes vector. N , mean scattering number; C , image contrast.

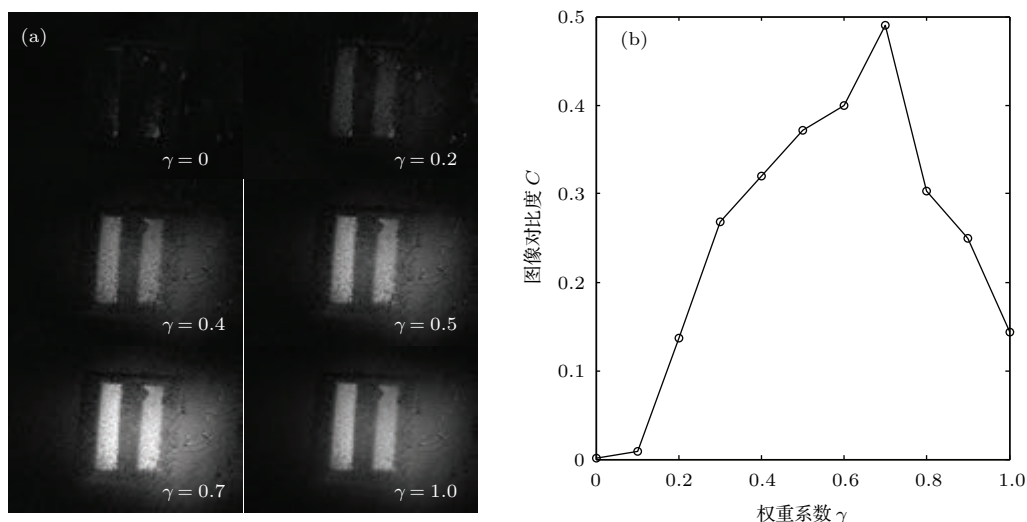


图6 $N = 0.26$ 时 (a) 偏振差分图像质量及 (b) 相应图像对比度与权重系数 γ 的关系
Fig. 6. (a) Polarization difference imaging quality and (b) the corresponding image contrasts as functions of weight factor γ in the scattering case of $N = 0.26$.

接下来我们研究偏振差分图像质量对权重系数的依赖特性, 结果如图6所示. 当线偏振光与散射介质相互作用时, Stokes 矢量中的线偏振元素 Q 与 U 之间的耦合效应并不明显, 使得入射光偏振态为 $[1, 0, 1, 0]^T$ 的情况下光学信息处理环节中权重系数的取值范围为 $[0, 1]$, 取值间隔为 0.1. 图6(a)显示了 $N = 0.26$ 时偏振差分图像质量与权重系数的关系, 限于篇幅仅给出了权重系数 $\gamma = 0, 0.2, 0.4, 0.5, 0.7, 1.0$ 时的情况. 图6(b)则为相应的图像对比度数值计算结果, 计算图像对比度所选取的位置仍为图4(a)中的方形区域. 通过图6可以观

察到, 不同的权重系数下偏振差分图像质量不同. $N = 0.26$ 所对应的最优权重系数 γ_{optimum} 为 0.7, 此时偏振差分图像具有最大对比度 0.49.

图7进一步给出了基于 Stokes 矢量的计算偏振差分图像中最优权重系数与平均散射次数的函数关系. 可见随着散射程度的增加, 最优权重系数呈现逐渐下降的趋势. 以上规律可以解释为: 随着散射程度的增加, 平均散射次数相应增加, Stokes 矢量中的线偏振元素 Q 与 U 之间的耦合效应逐渐减小. 这为以后的偏振差分水下成像中最优权重系数的选择提供了先验规律.

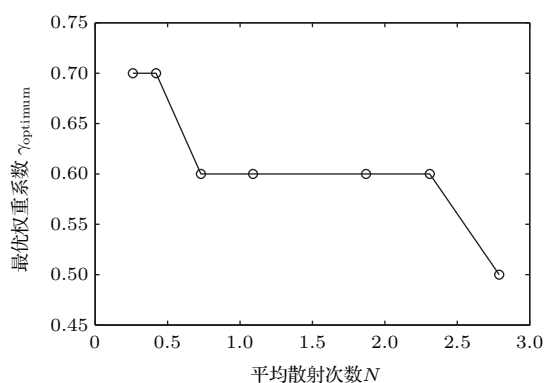


图7 基于 Stokes 矢量的计算偏振差分图像中最优权重系数 $\gamma_{optimum}$ 与平均散射次数 N 的函数关系

Fig. 7. The optimum weight factor $\gamma_{optimum}$ of computational polarization-difference imaging based on the Stokes vector as a function of N .

4 结 论

本文从理论与实验两个方面进行了实时的偏振差分水下成像研究. 通过分析偏振差分水下成像原理, 我们将 Stokes 矢量引入所建立的偏振差分水下成像物理模型, 在理论上提出了基于 Stokes 矢量的计算偏振差分方法来进行实时的水下物体探测, 最后通过实验系统地验证了所提方法的可行性.

研究结果表明: 基于 Stokes 矢量的计算偏振差分水下成像不仅可以揭示由于水体的散射而变得模糊不清的目标图像特征, 增加水下激光的探测距离; 并且在获得与传统偏振差分水下成像方法具有相同效果的同时, 通过对 Stokes 矢量的程序处理来代替光学检偏器的无规则机械转动, 实现了实时水下成像. 若将本文所提方法与偏振成像仪器相结合, 可以快速地获取光波的 Stokes 矢量, 进一步提

高水下目标探测与识别的效率.

参考文献

- [1] Schettini R, Corchs S 2010 *EURASIP J. Adv. Sig. Pr.* **2010** 1
- [2] Sun B, Hong J, Sun X B 2014 *Chin. Phys. B* **23** 094201
- [3] Zhao X W, Jin T, Chi H, Qu S 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 104201 (in Chinese) [赵欣慰, 金韬, 池灏, 曲嵩 2015 物理学报 **64** 104201]
- [4] Weiner A M 2011 *Nat. Photon.* **5** 332
- [5] Zhan P P, Tan W J, Si J H, Xu S C, Tong J Y, Hou X 2014 *Appl. Phys. Lett.* **104** 211907
- [6] Cao N W, Liu Y Q, Zhang Y J 2000 *Acta Phys. Sin.* **49** 61 (in Chinese) [曹念文, 刘玉清, 张玉钧 2000 物理学报 **49** 61]
- [7] Han J F, Yang K C, Xia M, Sun L Y, Cheng Z, Liu H, Ye J W 2015 *Appl. Opt.* **54** 3294
- [8] Bina M, Magatti D, Molteni M, Gatti A, Lugiato L A, Ferri F 2013 *Phys. Rev. Lett.* **110** 083901
- [9] Leonard I, Alfalou A, Brosseau C 2013 *Opt. Express* **21** 29283
- [10] Rowe M P, Pugh E N, Tyo J S, Engheta N 1995 *Opt. Lett.* **20** 608
- [11] Tyo J S, Pugh E N, Engheta N 1998 *J. Opt. Soc. Am. A* **15** 367
- [12] Tyo J S 2000 *J. Opt. Soc. Am. A* **17** 1
- [13] Treibitz T, Schechner Y Y 2009 *IEEE Trans. Pattern Anal.* **31** 385
- [14] Zhang Z G, Dong F L, Zhang Q C, Chu W G, Qiu K, Cheng T, Gao J, Wu X P 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 184204 (in Chinese) [张志刚, 董凤良, 张青川, 褚卫国, 仇康, 程腾, 高杰, 伍小平 2014 物理学报 **63** 184204]
- [15] Liao Y B 2003 *Polarized Light* (Beijing: Science Press) p61 (in Chinese) [廖延彪 2003 偏振光学 (北京: 科学出版社) 第 61 页]
- [16] Ntziachristos V 2010 *Nat. Meth.* **7** 603
- [17] Shi D F, Hu S X, Wang Y J 2014 *Opt. Lett.* **39** 1231

Real-time polarization difference underwater imaging based on Stokes vector^{*}

Guan Jin-Ge¹⁾ Zhu Jing-Ping^{1)2)†} Tian Heng¹⁾ Hou Xun²⁾

1) (Key Laboratory for Physical Electronics and Devices of the Ministry of Education, Department of Electronic Science and Technology, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

2) (Shaanxi Key Lab of Information Photonic Technique, Department of Electronic Science and Technology, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

(Received 1 May 2015; revised manuscript received 3 July 2015)

Abstract

Polarization difference imaging technique can effectively solve the underwater image deterioration problem that is caused by the interaction between light and water. Therefore, it has a significant application value in detecting and recognizing underwater target. In a traditional polarization difference imaging system, the object image is carried out by the common-mode rejection of background scattering light. However, the polarization state of the background scattering light is unknown, so the polarization difference imaging is realized by the irregular mechanical rotation of the optical polarization analyzer with two orthogonal polarization orientations. Therefore, it needs more time to determine the optimum detection angle of the polarization analyzer and cannot perform real-time underwater imaging, which restricts the rapid detecting function in the process of underwater imaging. In this paper, the detection principle of underwater polarization difference imaging is considered to exploit the difference in the polarization angle between background scattering light and target light. According to Marius's law, the physical model of polarization difference imaging is that the common-mode rejection of background scattering light will be achieved when the angles between the vibration direction of background and the two orthogonal polarization orientations are 45° . Because the Stokes vector can be used to express the polarization angle of light, we propose the principle and construction of a computational polarization difference imaging system for real-time underwater imaging by incorporating the Stokes vector into the established model. It replaces the mechanical rotation of the polarization analyzer in a traditional polarization difference imaging system with the information processing of the Stokes vector. The experimental results show that the proposed method not only has the same effective performance as the conventional polarization difference imaging compared with the regular imaging, but also can improve the blurred imaging performance caused by an underwater scattering effect as well as increase the underwater detection distance. This method realizes rapid underwater target detection and recognition because it saves a large amount of time compared with the traditional one. Further, if we combine this method with the current polarization imaging instruments that capture the Stokes vector instantaneously, then a real-time automatic underwater polarization imaging can improve the efficiency of the underwater target detection and recognition. These findings are helpful for designing and developing the underwater polarization difference imaging systems.

Keywords: underwater imaging, polarization, scattering, optical information processing

PACS: 42.25.Dd, 42.25.Ja, 42.30.Sy, 42.30.Va

DOI: 10.7498/aps.64.224203

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61205187).

† Corresponding author. E-mail: jpzhu@mail.xjtu.edu.cn